

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar

A BUDAI-HEGYSÉGBEN TALÁLHATÓ RADIOAKTÍV ANOMÁLIA KÖRNYEZETI SZEMPONTÚ VIZSGÁLATA

TDK DOLGOZAT

Készítette:

GROSCH MARIANN ÉS MÜLLER MELINDA

KÖRNYEZETTAN BSC SZAKOS HALLGATÓK

Témavezető:

SZABÓ CSABA, PH.D.

EGYETEMI DOCENS,
ELTE TTK, KÖZETTANI ÉS GEOKÉMIAI TANSZÉK,
LITOSZFÉRA FLUIDUM KUTATÓ LABORATÓRIUM

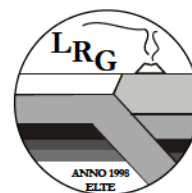
Konzulens:

SZABÓ ZSUZSANNA

KÖRNYEZETKUTATÓ, PH.D. HALLGATÓ,
ELTE TTK, KÖZETTANI ÉS GEOKÉMIAI TANSZÉK,
LITOSZFÉRA FLUIDUM KUTATÓ LABORATÓRIUM ÉS ATOMFIZIKAI TANSZÉK

BOROS ÁKOS

GEOLOGUS, GEOGRÁFUS,
ELTE TTK, KÖZETTANI ÉS GEOKÉMIAI TANSZÉK,
LITOSZFÉRA FLUIDUM KUTATÓ LABORATÓRIUM



Budapest
2009

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célok.....	3
2. Az urán, a tórium és ezek energetikai felhasználhatósága	4
2.1. Az urán	4
2.2. A tórium.....	5
2.3. Az atomreaktorokról általában	8
2.3.1. <i>Urán üzemanyagú reaktorok működésének áttekintése</i>	8
2.3.2. <i>Tórium üzemanyagú reaktorok működésének áttekintése</i>	10
2.4. A tórium üzemanyaggal működtetett reaktorok előnyei, hátrányai	12
3. A radon és a toron	13
4. A Nagy-Kopasz hegy és környékének földtani jellemzői	14
5. Mintavételezés.....	20
6. Vizsgálati módszerek	21
6.1. Globális pozíció meghatározása	21
6.2. Helyszíni dózisteljesítmény mérés	22
6.3. Nedves szitálás és lézeres szemcseeloszlás mérés módszere	22
6.4. Pásztázó elektronmikroszkópos és energiadiszperzív röntgenspektrométeres vizsgálatok módszere.....	23
6.5. Radon- és toronexhaláció meghatározásának módszere	25
6.6. Gamma-spektroszkópiai mérések módszere	27
7. Eredmények.....	29
7.1. Nedves szitálás és a lézeres szemcseeloszlás mérés eredményei	29
7.2. Pásztázó elektronmikroszkópos és energiadiszperzív röntgenspektrométeres vizsgálatok eredményei.....	31
7.3. Radon- és toronexhaláció mérések eredményei	33
7.4. Gamma-spektroszkópiai mérések eredményei	33
8. Eredmények értékelése és összefoglalás	34
English abstract	36
Köszönetnyilvánítás	37
Ábra- és táblázatjegyzék	37
Irodalomjegyzék.....	38

1. Bevezetés és célok

Magyarországon a Budai-hegység területéről ismert olyan tórium anomália, amelyet az 1947-ben kezdődő, a tórium- és urántartalom meghatározását szolgáló mérések tártak fel a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) szervezésében. Ezek az előzetes kutatások 1952-ben zárultak le. 1953-ban kezdődött a radioaktív hasadóanyagok eszközökben és módszerekben, megalapozottságban és célban új kutatási időszaka, amelynek részeként 1956-ban elindult a magyarországi tórium – ipari keretben történő – földtani kutatása (*Wéber, 2002*).

Az összesen körülbelül 14500 km² területen végzett légi-geofizikai mérések a Nagykovácsi és Budaörs között elterülő Nagy-Kopasz hegyen több jelentős radioaktív anomáliát mutattak ki a mezozoos karbonátos területeken (*Tyhomirov, 1965*). Ezeket a radioaktív anomáliákat a földtani viszonyokkal együtt figyelembe véve, kijelölhető egy 4,6 km²-es terület, ahol kutatóárokakat mélyített és földtani feltárást is kezdeményezett a Mecseki Ércbányászati Vállalat (MÉV) (*Wéber, 2002*). Az anomáliák többségét (tizennégyből kilencet) kutatóárokakkal és kutatóaknákkal tárták fel. A begyűjtött kőzetanyagok vizsgálata során ismertté vált, hogy a tórium-tartalom mellett a lantanida- (például cérium, neodímium, szamárium) és a nióbbium-tartalom is jelentős a területen (*Wéber, 2002*).

Diákköri munkánk célja, hogy a nagy-kopasz hegyi radioaktív anomália területen található egyik, 1. számú kutatóaknát, illetve annak meddőhányójából származó mintákat megvizsgáljuk többféle szempont alapján, mind geokémiai és mind fizikai módszerek segítségével. A lehetséges környezeti hatások vizsgálata mellett felvetjük az anomália pozitív kihasználhatóságának elvi lehetőségét is a tórium fűtőanyagú reaktorok bemutatásával. Eredményeinket ilyen szempontok alapján is értékeljük.

2. Az urán, a tórium és ezek energetikai felhasználhatósága

Ebben a fejezetben bemutatjuk az urán, illetve a tórium alapvető tulajdonságait. Írunk az urán üzemanyagú reaktorról és egy új technológiáról, amely a tóriumot kívánja felhasználni energianyerés céljára. Jelen dolgozat szempontjából ez azért érdekes, mert az általunk vizsgált területen található radioaktív anomáliát a tórium okozza, és szeretnénk ennek egy pozitív kihasználási lehetőségét is bemutatni, amihez szükséges részletesebben bemutatni a reaktorok működését is.

2.1. Az urán

Az uránt 1789-ben Martin Klaproth, német kémikus fedezte fel. Az ^{238}U nagy tömegszámú, radioaktív elem, olvadáspontja $1132\text{ }^{\circ}\text{C}$. A periódusos rendszerben az aktinidák csoportjába tartozik. Természetes előfordulását tekintve elsősorban a földi kéregben fordul elő. A talajok átlagos urántartalma $2,8\text{ ppm}$ (*UNSCEAR, 2006*). Az urán izotópok aránya úgy oszlik meg, hogy a ^{238}U adja az összes urán $99,3\%$ -át, míg az ^{235}U csupán $0,7\%$ -át. Ez abból következik, hogy a két izotópnak eltérő a felezési ideje. Míg az ^{238}U -nak $4,47 \cdot 10^9$ év (ennek bomlási sora az *1. ábrán* látható), addig az ^{235}U -nek $7,04 \cdot 10^8$ év a felezési ideje, így a ^{235}U jó része már elbomlott. Az urán több ásványban is dúsul, így uránszurokércben, vagy más néven uraninitban – UO_2 , továbbá allanitban – $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Ca})_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Be}, \text{Mg}, \text{Mn})_3[\text{O} \cdot \text{OH} \cdot \text{SiO}_4 \cdot \text{Si}_2\text{O}_7]$, monacitban – $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$ (*Koch, 1967*). A cirkon – ZrSiO_4 kristályszerkezetébe szintén beépülhet. Az urán lassú radioaktív bomlása $0,1\text{ W/t}$ hőt szolgáltat, ezzel biztosítva a Föld hőjét (*World Nuclear Association, 2006*).

Nuklid jele	Történelmi elnevezés és jel	Bomlásmód	Felezési idő
$^{238}_{92}\text{U}$	urán-I (U_1 vagy UI)	α , γ	$4,5 \times 10^9$ a
$^{234}_{90}\text{Th}$	urán- X_1 (UX_1)	β^- , γ	24,1 d
$^{234}_{91}\text{Pa}^m$	urán- X_2 (UX_2)	β^- , γ	1,17 min
$^{234}_{91}\text{Pa}$	urán-Z (UZ)	β^- , γ	6,75 h
$^{234}_{92}\text{U}$	urán-II (U_2 vagy UII)	α , γ	$2,47 \times 10^5$ a
$^{230}_{90}\text{Th}$	ionium (Io)	α , γ	$8,0 \times 10^4$ a
$^{226}_{88}\text{Ra}$		α , γ	1600 a
$^{222}_{86}\text{Rn}$	rádiumemanáció (RaEm)	α , γ	3,823 d
$^{218}_{84}\text{Po}$	rádium-A (RaA)	α , β^-	3,05 min
$^{214}_{82}\text{Pb}$	rádium-B (RaB)	β^- , γ	26,8 min
$^{218}_{85}\text{At}$		α	1,3 s
$^{214}_{83}\text{Bi}$	rádium-C (RaC)	α , β^- , γ	19,7 min
$^{214}_{84}\text{Po}$	rádium-C' (RaC')	α	$1,64 \times 10^{-4}$ s
$^{210}_{81}\text{Tl}$	rádium-C'' (RaC'')	β^- , γ	1,3 min
$^{210}_{82}\text{Pb}$	rádium-D (RaD)	α , β^- , γ	21 a
$^{210}_{83}\text{Bi}$	rádium-E (RaE)	α , β^-	5,01 d
$^{206}_{80}\text{Hg}$		β^- , γ	7,5 min
$^{210}_{84}\text{Po}$	rádium-F (RaF)	α , γ	138,4 d
$^{206}_{81}\text{Tl}$	rádium-E'' (RaE'')	β^-	4,19 min
$^{206}_{82}\text{Pb}$	rádium-G (RaG)	–	–

1. ábra: Az ^{238}U bomlási sora

(forrás: <http://www.kfki.hu/~cheminfo/hun/teazo/tn2000/hevesy.html>)

2.2. A tórium

A tóriumot 1828-ban fedezte fel egy svéd kémikus, Jons Jakob Berzelius és a vihar norvég istene, Thor után nevezte el. A ^{232}Th a természetben is előforduló, radioaktív elem

(bomlási sora a 2. ábrán látható). Felezési ideje rendkívül nagy, $1,4 \cdot 10^{10}$ év. A talajok átlagos tórium tartalma 7,4 ppm (UNSCEAR, 2000).

Az aktinidák közé tartozik, egy természetes és számos mesterséges izotópja ismert, ezek mindegyike alfa-bomló. Az elemi tórium fizikai paraméterei a következők: nyújtható, olvadáspontja körülbelül 1800°C , forráspontja 4790°C . Fontos kémiai tulajdonsága, hogy a tömény (cc.) savaknak és lúgoknak ellenáll. Geokémiai és energetikai szempontból jelentőségét növeli, hogy az uránál lényegesen, 4,2-szer nagyobb az előfordulási aránya a kontinentális kéregben (Allegre et al., 1988). A tórium fizikai, kémiai és geokémiai okok miatt az uránkutatáshoz és az atomenergiához kapcsolódik. Ezek a fizikai és kémiai tulajdonságok teszik alkalmassá, hogy gázizzók harisnyáját készíthessék belőle (nagyobb világítási hatásfoka miatt). Egy olyan reaktortípus elméleti alapjai is léteznek, ahol a tóriumot fűtőanyagként hasznosítják (ezzel a későbbiekben külön fejezetben foglalkozunk).

Nuklid jele	Történelmi elnevezés és jel	Bomlásmód	Felezési idő
$^{232}_{90}\text{Th}$		α, γ	$1,41 \times 10^{10}$ a
$^{228}_{88}\text{Ra}$	mezotórium-I (MsTh ₁)	β^-, γ	5,77 a
$^{228}_{89}\text{Ac}$	mezotórium-II (MsTh ₂)	β^-, γ	6,13 h
$^{228}_{90}\text{Th}$	radiotórium (RdTh)	α, γ	1,913 a
$^{224}_{88}\text{Ra}$	tórium-X (ThX)	α, γ	3,64 d
$^{220}_{86}\text{Rn}$	tóriumemanáció (Tn) toron	α, γ	55 s
$^{216}_{84}\text{Po}$	tórium -A (ThA)	α, β^-	0,158 s
$^{216}_{85}\text{At}$		α	3×10^{-4} s
$^{212}_{83}\text{Bi}$	tórium -B (ThB)	β^-, γ	10,64 h
$^{212}_{84}\text{Po}$	tórium -C (ThC)	α, β^-, γ	60,6 min
$^{212}_{84}\text{Po}$	tórium -C' (ThC')	α	$3,04 \times 10^{-7}$ s
$^{208}_{81}\text{Tl}$	tórium -C'' (ThC'')	β^-, γ	3,1 min
$^{208}_{82}\text{Pb}$	tórium -D (ThD)	–	–
	tóriumólom		

2. ábra: $A^{232}\text{Th}$ bomlási sora

(forrás: <http://www.kfki.hu/~cheminfo/hun/teazo/tn2000/hevesy.html>)

Megtalálható több ásványban is, mint például a tóritban (ThSiO_4), ami egy tórium tartalmú szilikát ásvány, amelyben urán, ritkaföldfém (pl. Ce, Pr, Nd, Pm), ólom, cirkónium, vas, kalcium helyettesítés is lehetséges. Üvegfényű vagy gyantafényű ásvány, színe barnás-fekete, zöldes-fekete, fekete lehet a helyettesítések függvényében. A tórium-dioxid (ThO_2) az egyik legnagyobb Th-tartalmú és olvadáspontú oxid, 3300 °C-on olvad. Tórium tartalmú ásvány továbbá a monacit $[(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4]$, ami egy olyan foszfát ásvány, ahol a Ce, La, Nd (ritkaföldfémek) mellett mindig jelen van tórium is. A monacit átlagosan 6-7% tórium tartalmat mutathat, amely esetenként akár 12% is lehet. A világ monacit készleteit 12 millió tonnára becsülik (*World Nuclear Assosiation, 2009*), ami azért fontos adat, mert tóriumot tartalmaz/tartalmazhat. A cheralit $[(\text{Ce}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$ nevű ásványt is érdemes kiemelni, ez a monacit csoport tagja. A cheralit elsősorban granitoidok pegmatitjaiban fordul elő, azonban Nagy Kopasz hegyen is kimutatták (*Wéber, 2002; Szabó & Boros, 2009*) (3. ábra).

Az alábbi táblázatban (1. táblázat) összesítjük a 2006. évi felmérés alapján a tórium becsült készletét a világ országaiban. Amint a táblázat is mutatja, Ausztália, USA, Törökország, India, Venezuela, Brazília rendelkezik meghatározó készletekkel (*World Nuclear Assosiation, 2006*).

1. táblázat: A világ becsült tórium készlete

Ország	Tonna	%/összes Th készlet
Ausztrália	489000	19
USA	400000	15
Törökország	344000	13
India	319000	12
Venezuela	300000	12
Brazília	302000	12
Norvégia	132000	5
Egyiptom	100000	4
Oroszország	75000	3
Görögország	54000	2
Kanada	44000	2
Dél-Afrikai Köztársaság	18000	1
Más országok	33000	1
Világ összes	2610000	

2.3. Az atomreaktorokról általában

2.3.1. Urán üzemanyagú reaktorok működésének áttekintése

Ezt az alfejezetet elsősorban a *Kiss et al. (1998)* Kísérleti Atomfizika című könyv alapján írtuk. Az atomreaktorokat többféleképpen is csoportosíthatjuk. Osztályozhatók a hasadóanyag (urán, plutónium), az urán dúsításának foka, a moderátor anyaga (víz, nehézvíz, grafit), a hűtőközeg (víz, gáz, fém), a felhasználás és a neutron-energia szerint. Utóbbi esetben elkülönítünk termikus, intermedier és gyors reaktorokat. Energiatermelés céljára általában a termikus reaktorok elterjedtek.

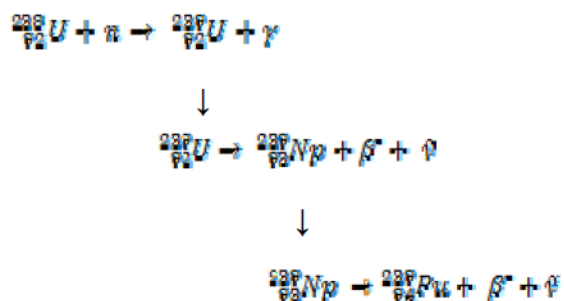
Termikus reaktorokban a keletkező, nagy (MeV-os) energiájú neutronokat le kell lassítani ahhoz, hogy önfenntartó láncreakció létrejöhessen. Ehhez olyan anyagokra van szükség (moderátor), amelyek könnyű atommagokat tartalmaznak, például hidrogént, deutériumot, szenet, berilliumot (H, D, C, Be). Ezért a moderátor anyagok legtöbbször H₂O, D₂O, grafit. A gyors neutronok ilyen közegbe kerülve rugalmas ütközések révén termikus energiákra lassulnak. Energetikai szempontból fontos, hogy a moderátor ne nyeljen el túl sok

neutront, különben szintén nem alakul ki láncreakció. Ha a termikus reaktorban a moderátor grafit vagy nehézvíz (D₂O), akkor az üzemanyag lehet természetes (nem dúsított) urán is. Ilyenkor a hűtőközeg nitrogén- vagy CO₂-gáz. A csernobili reaktor is ilyen, úgynevezett gáz-grafit rendszerű volt. A hűtőközeg lehet még folyadék is (H₂O, D₂O), ez esetben a moderátor és a hűtőközeg anyaga ugyanaz.

Az energiatermelés szempontjából kedvező hasadó tulajdonsággal rendelkező ²³⁵U a természetes uránnak csak 0,7%-a. Az izotópok szétválasztása a kis tömegkülönbség miatt nagyon költséges, a többi hasadó izotópot pedig csak mesterségesen lehet előállítani. Az egy neutron elnyelésére eső új neutronok száma (termikus neutronhozam, η) miatt, ha vizet használunk moderátornak, akkor viszont dúsított (²³⁵U-ben) uránra van szükségünk a reaktor működtetéséhez.

Intermedier reaktorról akkor beszélünk, amikor a neutronok nem tudnak termalizálódni, így eltolódnak a nagyobb energiák felé. Ilyen kisméretű reaktorok jellemzők például atommeghajtású hajókon és tengeralattjárókon.

A gyors tenyésztőreaktorok azt használják ki, hogy nagy dúsítású hasadóanyagnál az abszorpciós hatáskeresztmetszetek is kicsik, így nagyon jó neutronháztartás jöhet létre. Nemcsak a láncreakció marad fenn, hanem új hasadóanyag is keletkezik, „tenyészik” például ²³⁹Pu és ²³³U. A folyamat egyenlettel leírva a következő:



Ezekben a reaktorokban vízhűtés helyett folyékony fémet használnak. Ez általában folyékony nátrium (Na) vagy kálium (K). A korrózió és a Na égéséből származó robbanás veszélyes hidrogén kiküszöbölésére elektromágneses szivattyút alkalmaznak.

Felhasználás szerint a főbb reaktortípusok: energiatermelő (erőműi), hasadóanyag-termelő, kutató és oktató. A hasadóanyag-termelő reaktorok – ha a reaktor üzeme során több új hasadóanyag keletkezik, mint amennyi elfogy – nemcsak energiát termelnek, de működésük során új hasadóanyag is keletkezik.

Magyarországon jelenleg három atomreaktor működik: egy Pakson, amely az energiaellátást szolgálja, egy oktató reaktor a Budapesti Műszaki Egyetemen (BME) és egy kutató reaktor a Magyar Tudományos Akadémia Központi Fizikai Kutatóintézetében (KFKI).

2.3.2. Tórium üzemanyagú reaktorok működésének áttekintése

Már egy ideje foglalkoztatja az emberiséget, hogyan lehetne kiváltani a jelenleg használatos urán üzemanyagot. Ennek oka nem más, mint az urán üzemanyagú reaktorok működése során keletkező ^{239}Pu , valamint az urántelepek véges volta. A ^{239}Pu két okból is kedvezőtlen. Egyrészt mert nukleáris fegyverkezésre kiválóan alkalmas, másrészt ennek az izotópnek a tárolását meg kell oldani, mivel egy erősen radioaktív anyag. Carlo Rubbia, Nobel-díjas kutató vetette fel egy spallációs – igen nagy energiájú részecskékkel történő atommag bombázáskor létrejövő magreakció, sok könnyű részecske keletkezésével – neutronforrással kombinált tóriumos reaktor lehetőségét (*Rubbia et al., 1995-97* – CERN jelentések).

Speciális konstrukciót alkalmazva tórium is lehet atomreaktor fűtőanyag. Ezek a reaktorok eddig azonban nagyon rossz hatásfokkal működtek (*van Klinken, 1999*). Új lehetőséget jelent egy neutrongyorsító alkalmazása, amellyel a tórium jobban felhasználhatóvá válik. A gyorsneutronos energiaerősítőben a protonokat 1 GeV-ra gyorsítják. A gyors neutronokat protonok által indukált spallációval állítják elő (*van Klinken, 1999*). A spalláció/hasadás kombináció előnye, hogy a csak hasadással keletkező 2-3 neutron helyett, spallációval 20-40 neutron keletkezik, így intenzív neutronforrás jön létre (*Szatmáry, 1994*). A neutronok egy grafitral moderált és vízzel hűtött, tóriumot tartalmazó rendszerbe jutnak. Ezek a tórium-grafit fűtőelemek golyó alakúak (ilyet javasol *Rubbia et al. (1995-97)* is), a neutronok hatására pedig ^{233}U keletkezik. A megfelelő neutronfluxussal elérhetjük, hogy a gyorsító által felhasznált elektromos energiát megsokszorozva kapjuk vissza. 10^{22} n/cm²s értékű neutronfluxusnál az ^{233}U és a ^{232}Th mennyisége arányos lesz egymással. A németországi Jülichben épült AVR (Arbeitsgemeinschaft VersuchtReaktor) kísérleti és kutatási célra épült, nagy hőmérsékletű reaktorban a *Rubbia et al. (1995-97)* által javasolt golyó alakú fűtőelemeket alkalmazták. Az urán és a tórium burkolt szemcsék formájában, grafit golyókba van ágyazva – az urán nem keveredik a tóriummal. Hűtőközegként pedig héliumot alkalmaztak. A hélium miatt itt a vízhűtésnél nagyobb kilépő hőmérsékletet érhettek el (950°C) (*Szatmáry, 1994*).

Egy ^{235}U -el üzemelő könnyűvízes reaktor évente 330 kg ^{239}Pu -ot termel GW-onként. A tóriummal üzemeltetett gyorsneutronos energiaerősítő főleg ^{233}U -at termel és szinte semmi Pu-ot vagy más nehéz aktinidát. Ebben az esetben ^{233}U , ^{234}U van jelen a legnagyobb mennyiségben, továbbá néhány százalékos arányban keletkezik ^{235}U , ^{236}U és ^{238}U , a Pu-izotópok (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) pedig szinte elhanyagolható mennyiségűek. Ami nehézséget okoz, hogy az ^{233}U erősen sugárzó (gamma-fotonokat bocsát ki), ezért ennek kezelését meg

kellene oldani. Előny, hogy a gyorsneutronos energiaerősítővel lehetővé válna a felhalmozott plutónium készletek elégetése (*van Klinken, 1999*).

Előnye a tóriumot hasznosító reaktornak, hogy a rendszer szubkritikus így a spallációs neutronforrás megsokszorozódik. A szubkritikus rendszer azt jelenti, hogy az effektív sokszorozási tényező (k_{eff}) – az egy neutronciklus alatt bekövetkező neutrons szám sokszorozódás értékét adja meg – kisebb mint 1. Így a neutronfluxus nő az idő függvényében, de a folyamat dinamikáját a késő neutronok szabják meg. További pozitívum, hogy egy külső forrással meghajtott szubkritikus reaktorban nincs szükség tartalék reaktivitásra¹, ami azt jelenti, hogy a kombinált rendszer – hasadási és a gyorsító technológia együttes alkalmazása – tetszőleges ideig üzemben tartható (*Szatmáry, 1994*).

Az új hasadóanyag termelését egy úgynevezett C konverziós tényezővel – a reaktorban egy adott idő alatt keletkező új hasadóanyag tömegének és az eredetileg bevitt hasadóanyagból eközben elhasznált rész tömegének a hányadosával – lehet jellemezni. Ha $C > 1$, akkor beszélünk tenyésztésről, ami azt jelenti, hogy ilyenkor a reaktorban több hasadóanyag van, mint amennyi induláskor belekerült. Ha $C < 1$, akkor csak izotópátalakulásról van szó. Figyelembe véve, hogy a reaktor szabályozása (szabályzó rudak), a kiszökés és az úgynevezett parazita neutronbefogás is fogyaszt neutronokat, a (termikus) neutronhozamnak (η) – dimenzió nélküli szám – 2-nél nagyobb kell lennie ahhoz, hogy $C > 1$ bekövetkezzen. A mellékelt táblázat alapján (2. táblázat) láthatjuk a gyorsreaktorokban a tenyésztés probléma mentesen kivitelezhető ($\eta > 2$, ezért $C > 1$). Termikus reaktorban viszont ^{233}U -nál, grafit és nehézvíz moderátor konstrukcióval $C \approx 1$, ezért tenyésztésre nem a legalkalmasabb. *Rubbia et al. (1995-97)* által elvégzett kísérletek alapján úgy tűnik, hogy ^{232}Th -t és ^{233}U -at a jelenleg működő reaktorok bármelyikében lehet alkalmazni (*Szatmáry, 1994*). A kanadai CANDU (CANadian Deuterium Uranium) reaktor nehézvíz moderátorú és urán üzemanyagú, itt több vizsgálatot is végeztek 1980-tól a ^{232}Th alapú üzemanyag lehetőségeit illetően (*Szatmáry, 1994*). A számítások pedig azt mutatják, hogy $C > 1$, tehát a hasadóanyag tenyésztés lehetséges. A már említett AVR reaktor, egy tóriummal kevert dúsított urán üzemanyagú rendszer, grafit moderátorral. Fűtőelemei olyan golyók, amelyeket *Rubbia et al. (1995-97)* is javasol. Ez a két példa *Szatmáry (1994)* szerint bizonyította, hogy ezek a rendszerek reálisan tenyésztővé tehetők.¹

¹ Reaktivitás alatt az effektív sokszorozási tényező 1-től való relatív eltérését értjük:

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}, \text{ ahol } k_{\text{eff}} = \text{az effektív sokszorozási tényező, } \rho = \text{a reaktivitás}$$

**2. táblázat: Egyes hasadóanyagok és a hozzájuk tartozó termikus- és gyorsneutron hozam
(Szatmáry, 1994)**

izotóp (hasadóanyag)	η (termikus)	η (gyors)
^{233}U	2,29	2,45
^{235}U	2,07	2,3
^{238}U	2,09	2,7

2.4. A tórium üzemanyaggal működtetett reaktorok előnyei, hátrányai

Ebben az alfejezetben összefoglaljuk, hogy milyen előnyei és hátrányai vannak egy ^{232}Th -t használó reaktornak az uránciklushoz képest. A fentiekben leírtak alapján láthatjuk, hogy a ^{232}Th -ból nyert energia lehetősége reális, annak ellenére, hogy a folyamat első lépéséhez szükséges neutrongyorsítóval kapcsolatban vannak még megoldatlan problémák. Mindenképpen előny, hogy a tórium alkalmazásával elkerülhető a problémát jelentő ^{239}Pu , mivel a ^{232}Th ciklus ^{233}U -at termel. Ez az urán-izotóp nem használható nukleáris fegyverkezésre, mert az ^{233}U mellett a fentebb említett módon több izotóp is keletkezik (^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U) és ezeket nagyon költséges lenne szétválasztani egymástól. A folyamat során nagyon kevés hosszú felezési idejű hulladék keletkezik, konkrétan 1000-szer kevesebb aktinida jön létre, mint az U/Pu ciklus során. Ez nagy könnyebbséget jelent a hulladékok elhelyezését illetően.

A ^{232}Th mennyisége a (magyarországi) talajokban átlagosan 7,4 ppm, az ^{238}U -é 2,3 ppm, így ha figyelembe vesszük, hogy az ^{235}U az összes uránnak csak 0,7%-a akkor láthatjuk, hogy a ^{232}Th -ból körülbelül (több mint) két nagyságrenddel több van, mint a ^{232}Th -ból és eloszlása a világban is egyenletesebbnek tekinthető.

A gyors energiaerősítő reaktora szubkritikus. *Rubbia et al. (1995-97)* állítása szerint ebből kifolyólag a rendszer maximálisan biztonságos. A tóriumos reaktorba, az uránoshoz hasonlóan induláskor hasadóanyagot kell bevinni, kivéve a spalláció/hasadás kombinációnál, itt kezdeti hasadóanyagra sincs feltétlenül szükség.

Hátrány jelenthet, hogy az ^{233}U bomlástermékei között ^{208}Tl és ^{212}Bi található, amelyek 1,8, valamint 2,6 MeV-os gamma-sugarakat emittálnak, ezért a fűtőelem gyártás távvezérelt technológiát igényelne, ami drágább, mint a hagyományos fűtőelem gyártás. A ^{233}Pa 27 napos felezési ideje miatt a reaktor leállítása után reaktivitás gondokat okozhat. Említést kell tenni arról, hogy a csernobili katasztrófánál jelentős szerepet játszó úgynevezett üregegyüttérhető^{2(köv. old.)} egy grafitral moderált és vízzel hűtött Th/U reaktorban lehet pozitív.

Mint látjuk, a rendszernek vannak előnyei és hátrányai egyaránt, a két technológia között a döntő talán az urán ár alakulása lehet majd, ezek ellenére fontosnak tartottuk megemlíteni ennek a kialakulóban lévő technikának a lehetőségét.

3. A radon és a toron

A radon színtelen, szagtalan, radioaktív nemesgáz. Három természetes izotópja létezik: a radon (^{222}Rn , ^{238}U bomlási sora), a toron (^{220}Rn , ^{232}Th bomlási sora) és az aktinon (^{219}Rn , ^{235}U bomlási sora). Ezen izotópok közül a két leglényegesebb a radon (^{222}Rn) és a toron (^{220}Rn), mert a zárt légterekben feldúsulhatnak. Télen és nyáron különböző okok miatt különbözik a beltéri radonaktivitás-koncentráció (Denman *et al.*, 2007): a kültéri és a beltéri légnyomás közti különbség, az eltérő szellőztetési szokások, az eltérő páratartalom és az eltérő légmozgási viszonyok miatt. Mindezeket egybevetve azt kapjuk, hogy télen általában nagyobb az aktivitás-koncentráció (Jönsson *et al.*, 1995). Az aktinonnal (^{219}Rn) azért nem foglalkozunk, mert ezen radonizotópnak a légterei jelenléte elhanyagolható a nagyon rövid felezési ideje (4 s) miatt. Az izotópok fontosságát emeli, hogy a radon és leányelemei felelősek a földi eredetű, természetes sugárterhelés 54%-áért (UNSCEAR, 2000).

A radon nemesgáz, rendszáma 86, atomtömege 222,02 g (legnehezebb gáz a Földön). Nemesgáz mivoltából következik, hogy nagy a mobilitása, mert a legkülső elektronhéj zártsága miatt nem képes kémiai kötődésre. Ezért repedések mentén felszínre kerülhet széndioxid (CO₂) együtt (Beaibien *et al.*, 2003; Perrier *et al.*, 2008). Nagy vízdoldhatósága miatt akár hidrotermálisan is felszínre kerülhet, például mofettáknál (vulkáni utótevékenység), ami elsősorban nagy CO₂ feláramlásával jár, de más gázok is találhatók benne (például H₂O). Az ilyen típusú megjelenés az izotóp felezési idejének függvénye.

A ^{222}Rn felezési ideje 3,82 nap. Ez a leghosszabb felezési idejű radon izotóp, ezért ennek van a leginkább lehetősége feldúsulni a beltéri levegőben. A ^{222}Rn anyaeleme a ^{226}Ra , első leányeleme a ^{218}Po . A keletkezése és a bomlása is alfa-sugárzással történik. Ebből a radonizotópból keletkező első négy szilárd leányeleme (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) kevesebb, mint 30 perces felezési idővel rendelkezik, a tüdőbe bekerülve elbomlanak, a tüdő öntisztulási mechanizmusával nem tudnak kikerülni (Nazaroff és Nero, 1988). A ^{218}Po egy szabad pozitív ion, így az esetek többségében nem kapcsolódik aeroszolokhoz. A kötetlen pozitív ^{218}Po ionok diffúziós képessége megegyezik a ^{222}Rn -vel, de ennek gyorsasága nagyobb, mint a nagyobb aeroszolok diffúziója (Nazaroff és Nero, 1988).

A tüdőrák kockázatát jelentősen megnöveli a ^{222}Rn dús légtér, mert a ^{222}Rn és leányelemei alfa-bomlással adják le az energiájukat, amely a gyors felezési idejük

következtében nem kerül ki a tüdő öntisztító működésével. A ^{222}Rn dúsulásáért legfőbbképpen a talajban lévő ^{226}Ra bomlása okolható. A már fentebb említett nemesgáz tulajdonsága miatt a ^{222}Rn átjutva a vékony talaj és beton rétegen bekerül a ház légterébe. Könnyű vízzoldhatósága miatt a talajvízben, forrásvízben, kútvízben (sőt a vezetékesben is) dúsulhat.

A toron (^{220}Rn) szintén dúsulhat belterekben, de a rövidebb felezési ideje (55,6 s) miatt eddig nem vizsgálták kellőképpen. Több kínai, indiai és olaszországi kutatás a radon mellett a toronaktivitás-koncentrációt is meghatározta. Ezek a tanulmányok megmutatták, hogy ha az építőanyag toronexhalációja nagy, akkor a beltéri levegőben feldúsulhat, sőt még a radonaktivitás-koncentrációt is meghaladhatja az értéke (Guizhi *et al.*, 2008). A forrástól, vagyis a falaktól távolodva az aktivitás-koncentrációja exponenciálisan csökken (Guo *et al.*, 2000), tehát a szoba belseje felé haladva csökken a toronaktivitás-koncentráció. A toron két leányelemének nagyobb a felezési ideje, mint a sajátja: az ^{212}Pb -nek 10,64 óra, a ^{212}Bi -nek 60,55 perc. Ez a két izotóp aeroszolként van jelen a beltéri levegőben. A szobában viszonylagosan egyenletesen oszlanak el, így a toronaktivitás-koncentrációval ellentétben nem csökken az aktivitás-koncentrációjuk a falaktól távolodva. Ez a megfigyelés azért fontos, mert ennek a két radioizotópnak az emberi szervezetben megtett útja (az aeroszol tulajdonságából következőleg) hosszabb, mint a tüdőbe jutás. A nagyobb felezési ideje miatt több szövetbe is eljuthat és azokat is károsíthatja (Steinhauser, 1996).

4. A Nagy-Kopasz hegy és környékének földtani jellemzői

A 3. ábra mutatja be a terület földtani viszonyait. A Nagy-Kopasz hegy legidősebb földtani képződménye a Budaörsi Dolomit Formáció. A Budai-hegység középső-felső triász, mészalgas dolomitja 300-tól akár 1200 méter mélységig is fellelhető. A legmeghatározóbb geológiai egységek azonban a hegység jelentős részét képező Fődolomit Formáció és Dachsteini Mészkő Formáció. A Fődolomit Formációt halványbarna, illetve szürkés dolomit építi fel, a Dachsteini Mészkő Formáció a Budai-hegység területén vastagpados, onkoidos felépítésű. A képződmények késő-triász korúak, az utóbbinak pedig a Fenyőfői Tagozatát is megtaláljuk a területen. A Fenyőfői Tagozat mintegy átmenetként jelentkezik a két formáció között. A formációk jelentős vastagságú karbonátos platform képződmények, ez 800-1500 méter vertikális kiterjedést jelent (Haas, 2004).

Jura képződményeket nem találunk a vizsgált területen, a krétát is egyedül csak a Budakeszi Pikrit Formáció jelzi. Ez a formáció valójában bázisos-ultrabázisos telérközet, ami

nagyrészt színes elegyrészeket tartalmaz és nagy illó-tartalom jellemzi (*Horváth et al., 1983; Horváth et al. 1984; Szabó, 1985; Kubovics és Szabó, 1988; Szabó et al., 1993*).

Foltokban előfordul az eocén korú Gánti Bauxit Formáció – a Budai hegységben több helyen is megtalálható – a Csolnoki Formáció és a Dorogi Formáció is. Előbbi agyagos, márgás képződmény, míg utóbbi agyagos, kőszenes, esetenként bauxitos összetételű (*Bence et al., 1990; Császár, 1996*). Nagy kiterjedésben található oligocén korú Hárshgyi Homokkő Formáció, amely uralkodóan durvaszemcsés homokkő, néhol finomhomokkő agyagos közbetelepülésekkel (*Korpás, 1981*). A miocén a Tinnyei Formáció és a Budafoki Formáció képviseli. A Tinnyei Formáció biogén mészkő, mészhomokkő, meszes homok, a Budafoki Formáció homokos, homokkőves (*Bence et al., 1990*). A pannóniaiban keletkezett Csákvári Agyagmárga Formáció néhány kibukkanása is megfigyelhető a területen (*Jámbor, 1980*).

A negyedidőszaki képződményeket tekintve a löszös-homokos képződmények, valamint különböző lejtő- és folyóvízi üledékek a legmeghatározóbbak. Így másodlagosan felhalmozódhatnak olyan nehéz ásványok, mint pl. a tórit.

Itt fontos megemlíteni a területen korábban végzett radiometriai kutatásokat és mérési eredményeket (*pl. Wéber, 2002*), amelyek a vizsgálatok elmélyítésének szükségességét vetették fel.

A már említett tórium-anomáliák triász, azon belül is ladin-karni dolomitokból és a nori Dachsteini Mészköből álló területeken fordulnak elő elsősorban. Azonban meg kell jegyezni, hogy nem csak ezekre a képződményekre jellemző, ugyanis *Wéber (1989)* szerint a negyedidőszaki eróziós folyamatok is nagy szerepet játszottak az elterjedési terület kialakulásában. Továbbá figyelembe kell venni a hidrotermális hatásokat is, amit a tórium mellett található higany jelenléte is igazol, mivel a hosszan tartó hidrotermális hatás során az egyik legkésőbb kiváló elem. Ugyancsak ezt támasztja alá a makroszkóposan is megfigyelhető higany tartalmú kísérvőásvány, a cinnabarit. Lehetséges továbbá, hogy a tórium-tartalmú kaolinites agyag eredetileg egy földpátos, tóriumot tartalmazó telérmű volt, amelyet a már korábban tárgyalt feláramló hidrotermák erodáltak (*Wéber, 2002*).

Az anomális terület felfedezése az 50-es években történt, amelynek érdekes előtörténete, hogy az 1957-1958-ban végzett Nagy-Kopasz hegyi fúrásoknál a kiváltó tényező előbb vált ismertté, mint a közvetlenül ráutaló mágneses anomália. Több kutatóárcot is mélyítettek a területen és térképező fúrások is feltárták az anomáliát, ezek közül a 4-es számú fúrás két szakaszát (91,8-98,0 méter és 119,4-120,0 méter) tanulmányozták különös részletességgel (*Szabó, 1958*). Az innen származó minták összetétele uralkodóan biotit (33-40%). További ásványok, közelítőleg gyakoriság alapján felsorolva: karbonát, turmalin (fehér), klorit, andaluzit, korund, amfibol, zoisit, epidot, ensztatit. Ezekben az ásványokban az urán, tórium és ritkaföldfém nem általánosan előforduló elem. A nem felszíni minták ásványai mindig épek és üdék, ami különösen a fúrásokban látszott jól. Az elemzést Mihályi Pálné végezte a Földtani Intézetben (1958) (*Wéber, 2002*). A minták differenciál termoanalízis (DTA) vizsgálata montmorillonitot, kaolinitet és kalcitot mutatott ki. A mikroszkópos közettani vizsgálatot Fazekas Via végezte (1970) (*Wéber, 2002*). Elemzése alapján a fő közetalkotó ásvány a biotit-flogopit (40-50%), a másik fontos alkotó monoklin piroxén (5%), jelen van továbbá 10% magnézium gazdag dolomit. Körülbelül 30%-nyi agyagásvány mint kötőanyag van jelen.

A Nagykovácsiban található lamprofir telérek egyértelműen felelőssé tehetőek az ott kialakult tórium és toron anomáliákért. A „biotit” (biotit-gazdag lamprofir) keletkezése olyan folyamatok eredménye, amelyek az anomália megjelenését eredményezték a triász karbonátos formációkban. Ilyen lehet egy pegmatitos-hidrotermális folyamatsor. Ezekkel az

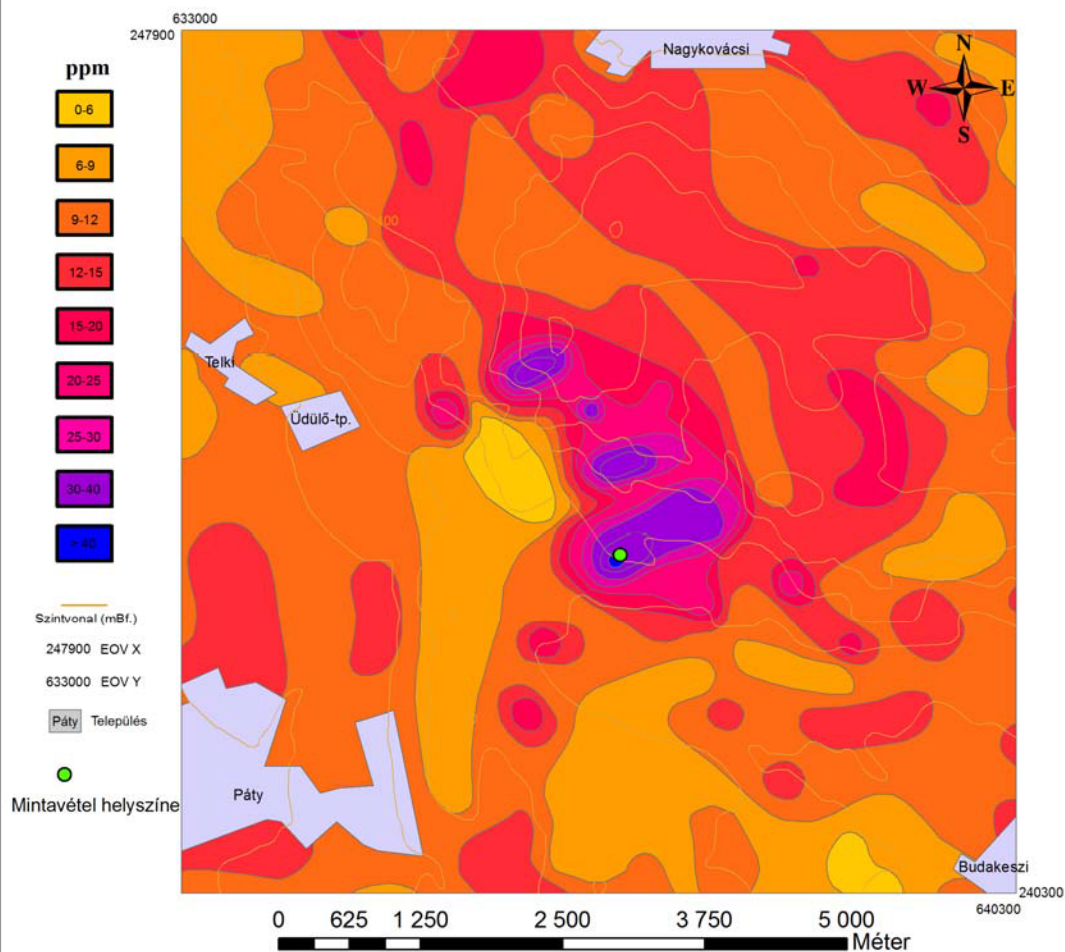
anomáliákkal állhat kapcsolatban a budai hévforrások toron (^{220}Rn) és radon (^{222}Rn) valamint oldott elemtartalma, mint például: F, Ba, Sr, SiO_2 , PO_4 (Wéber, 2002).

A feltárt anomáliára az ÉNy-DK irány jellemző (4. ábra), egy ilyen irányú egyenes mentén összeköthető a nagykovácsi és a budaörsi anomáliaterület. Jelentős hasonlóságok fedezhetők fel ezek között: tóriumban gazdag geológiai képződmények, az előfordulások típusa; a két terület között mindössze 8 km távolság van.

Ez arra enged következtetni, hogy a Budai-hegység egészét érintő szerkezetföldtani összefüggéssel van dolgunk. További kutatásokban arra következtetnek, hogy a Velencei-hegységben kimutatott dolomitos karbonatit és a budai-hegységi biotitit egy késő mezozoos regionális magmatizmussal kapcsolódik egymáshoz (Wéber, 2002). A nagykovácsi "biotitit" valószínűleg a legfiatalabb, a környezetében ismert mezozoos magmatit-előfordulások között. A kálium dominanciája a szerkezetileg aktívabb területekre jellemző. Uralkodó jellege felveti az intermedier dioritos, szienites-gránitos magma lehetőségét. Ez azért is fontos, mert a Budai-hegységben fellelt tórium-ásványok, mint például a cheralit $[(\text{Ce}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$ elsődlegesen a granitoidok pegmatitjaiban fordulnak elő. Ebből eredően a biotit szienites-alkáli gránitos eredete sem zárható ki. Szerkezetföldtani szempontból valószínűleg a hegység kiemelkedéséhez tartozó preorogén-szinorogén folyamatok része. Kérdéseket vet fel azonban, hogy a tórium érc ólom izotóp kora a biotititnél idősebb képződést mutat (Gálné et al., 1988). Erre lehetséges magyarázatként szolgálhat, ha feltételezzük, hogy a Budai-hegység üledékes formációinak kristályos aljzatán az elsődleges ásványosodásban egy több fázisú regeneráció következhetett be (Wéber, 2002).

A Nagy-Kopasz hegy és környékének ekvivalens tórium koncentráció térképe

1:50000



4. ábra: A Nagy-Kopasz hegy és környékének légigamma-tórium eloszlás térképe –
Tyhomirov, 1965; Boros, 2008 által módosítva

5. Mintavételezés

A mintavételezési helyszínválasztást több tényező határozta meg, elsősorban *Wéber (1961)* és *Dudko (1984)* korábbi kutatása, továbbá Puszpán Simon úr szóbeli közlése (lévén a helyszín komoly ismerője). Adyliget felől, Budapestet elhagyva a piros jelzésű turistautakon és majd egy erdészeti úton közelítettük meg az 1. számú aknát (*Gerzson és Wéber, 1960*). Az aknához vezető részletes útvonal az 5. ábrán látható. Az akna helyét a 7. és 8. pontnál elhelyezkedő kör mutatja. (A térképen látható többi arab számról a fejezetben később lesz szó.)



5. ábra: Az 1. számú akna megközelítési útvonala Budapest, Adyliget irányából. A térképrészlet a Nagy-Kopasz hegy északkeleti részét fedi le

Az 1. számú akna mélysége körülbelül 25 méter, alakja négyszögletű, technikai problémák miatt azonban nem tudtunk lejutni bele. A mintákat a vöröses-barnás színű meddőhányóról vettük, amely az egyes kutatóaknától körülbelül 10-15 méterre, az erdészeti úttól pedig kb. 100-120 méterre helyezkedik el. A meddőhányó szélessége kb. 2-3 méter, a magassága 1 méter körüli. A mintagyűjtés a hányó felszínéről történt, függőlegesen lefelé haladva, így olyan helyről is tudtunk mintát venni, ami talán nem állt közvetlen kapcsolatban a felszínnel. A részletesebb vizsgálatokhoz a meddőhányó nyugati és keleti széléről vett mintákat használtuk fel. A minták (amelyeket NK5 és NK6 jellel láttuk el) a helyszínen eltérő dózisteljesítményt mutattak.

Az NK5 jelű minta vörös színű. A meddő nyugati végén, a felszíntől 30 centiméterre mért dózisteljesítmény 570 nSv/h volt, innen származik az a minta. Ez az érték több mint ötszöröse az átlagos napi háttér értéknek (70-80 nSv/h).

A meddő keleti végén, a felszínen mért dózisteljesítmény 2730 nSv/h. Innen vettük az NK6 jelű mintát. Ez a minta kinézetben teljesen megegyezik az NK5-ös mintával, így csak az eltérő dózisteljesítmény értékükben különböznek (3. táblázat). A minták tömege egyenként

körülbelül 1,5-2 kg. Szemcseösszetételét tekintve az általunk látott legnagyobb tartomány az 5-6 centiméteres durvaszemcsés közettörmelék volt.

A helyszíni dózisteljesítmény méréseket Thermo Scientific FH 40G-L10 nevű műszerrel végeztük. A GPS koordinátákat Garmin GPS 60-al határoztuk meg (3. táblázat). A 3. táblázat hetedik értéke az NK5 mintát, a nyolcadik pedig az NK6 mintát takarja.

3. táblázat: A nagy-kopasz hegyi mérési helyszíneknek (5. ábra) GPS és EOVS koordinátái, illetve mért dózisteljesítményei

Sorszám	GPS koordináták	EOV koordináták	Dózisteljesítmény
1	E 47°32'50" N 18°54'53"	Y 640009.443 X 244821.324	90,1 nSv/h
2	E 47°32'50" N 18°54'51"	Y 639967.624 X 244821.395	110 nSv/h
3	E 47°32'52" N 18°54'43"	Y 639800.459 X 244883.45	100 nSv/h
4	E 47°32'52" N 18°54'39"	Y 639716.824 X 244883.596	177 nSv/h
5	E 47°33'10" N 18°53'42"	Y 638526.108 X 245441.697	190 nSv/h
6	E 47°33'10" N 18°53'41"	Y 638505.201 X 245441.738	182 nSv/h
7 (NK5)	E 47°33'00" N 18°52'57"	Y 637584.643 X 245134.793	400-570 nSv/h
8 (NK6)	E 47°32'00" N 18°52'57"	Y 637584.643 X 245134.793	1700-2730 nSv/h

6. Vizsgálati módszerek

6.1. Globális pozíció meghatározása

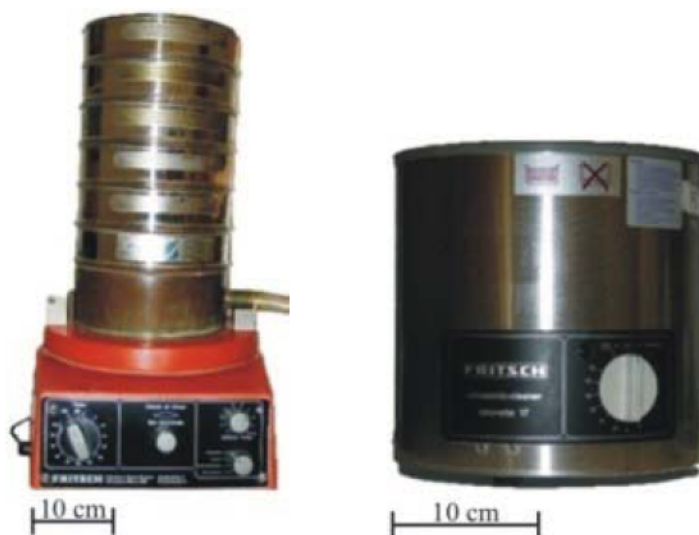
A GPS koordinátákat Garmin GPS 60-al határoztuk meg. A GPS készülék 24 (plusz 3 tartalék) műhold alapján határozza meg a tartózkodási helyet, amelyet a felszínen elhelyezett fix adók segítségével korrigál. A GPS maximális mérési hibája 26 méter horizontálisan, vertikálisan ennek többszöröse.

6.2. Helyszíni dózisteljesítmény mérés

A helyszíni dózisteljesítmény méréseket egy Thermo Scientific FH 40G-L10 típusú műszerrel végeztük. A hordozható műszer mérési tartománya 10 nSv/h - 100 mSv/h, energiatartománya 30 keV - 4,4 MeV.

6.3. Nedves szitálás és lézeres szemcseeloszlás mérés módszere

A Nagy-Kopasz hegyen begyűjtött NK5 és NK6 jelű mintákat nedves szitálás segítségével szemcseméret frakciókra bontottuk a szemcseméret eloszlás vizsgálata és a további vizsgálatok kivitelezése érdekében. A szitálást egy FRITSCH Vibratory Sieve Shaker Vibratory Micro Mill típusú rázógépen végeztük (6. ábra), miután a géphez tartozó FRITSCH szitákból szitasorozatot építettünk. A szitáknak eltérő lyukátmérői vannak, amelyek a legkisebbtől haladva a következők: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm. Így nedves szitálás után hét frakciót kaptunk: <0,063 mm, 0,063-0,125 mm, 0,125-0,25 mm, 0,25-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm, >2 mm. A nedves szitálás hátránya, hogy anyagvesztéssel jár, de mintáink száraz szitálása nem volt kivitelezhető nagy agyagtartalmuk miatt.



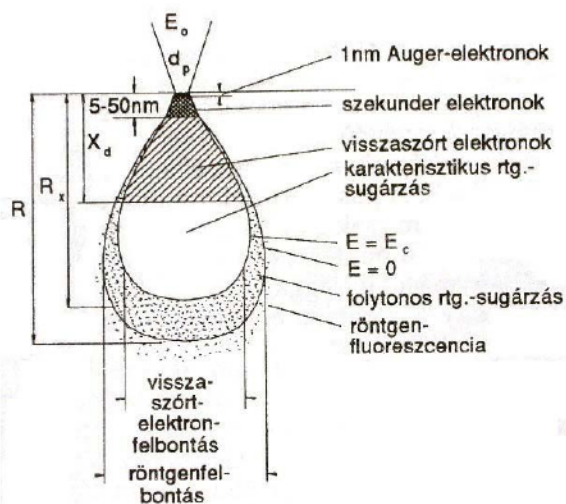
6. ábra: A használt FRITSCH Vibratory Sieve Shaker Vibratory Micro Mill szitasor és a FRITSCH Ultrasonic tisztító berendezés

Mivel a szitálás során a 63 μ m alatti mérettartományt nem tudtuk megvizsgálni, ezért ezt a mérettartományt egy FRITSCH Particle Sizer Analysette 22 típusú lézeres szemcseeloszlás mérővel elemeztük meg. A mérőberendezés a 16 nm alatti tartományt már nem képes mérni, ezért a kapott százalékos eloszlásdiagramból ez a frakció hiányzik. A

műszer két részből áll: az egyik a diszpergáló (biztosítja, hogy ne ragadjanak össze a szemcsék), a másik pedig az átfolyós küvettára merőleges lézeres mérő. A műszer össze van kötve a diszpergálóval, két vékony (kb. 0,5 mm átmérőjű) gumicsővel. A diszpergálóba emulgeálószer van, hogy meggátolja főleg az agyagos szemcsék összetapadását. Minden vizsgálat előtt át kell mosni a küvettát és meg kell nézni a háttérét. A mérés során a számítógéphez tartozó szoftverrel vettük fel a frakciók eloszlását.

6.4. Pásztázó elektronmikroszkópos és energiadiszerzív röntgenspektrométeres vizsgálatok módszere

A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) lényege, hogy egy kellően fókuszált elektronsugárral a csiszolással és polírozással előkészített minta felszínét végigpásztázzuk. Mi egy AMRAY 1830 I/T6 típusú SEM-ot használtunk. Amikor az elektron kölcsönhatásba kerül az anyaggal, akkor egy úgynevezett gerjesztési körte alakul ki. Ez nem azért keletkezik, mert a műszer nem tudja kellően kis területre fókuszálni a sugarat, hanem azért, mert a minta anyagában lévő elemeken szóródik az elektronsugár. A gerjesztési körte részletesen a 7. ábrán látható.



7. ábra: A SEM különböző üzemmódjainak gerjesztési térfogata a mintában

Pásztázó elektronmikroszkóppal a szekunder elektronok adnak képet a minta felszínről. Ezeknek az 50 eV-nál kisebb energiájú elektronoknak a nagy hányada úgy keletkezik, hogy 5-50 nm-es mélységben az elektronsugár kölcsönhatásba lép az itt található atomok elektronjaival oly módon, hogy a legkülső héjon lévő leglazábban kötött elektronokat leszakítja. A szekunder elektronok kisebb része pedig a kis energiájú visszaszórított elektronok. A szekunder elektron képen lehet látni a mintában lévő üregeket és kiemelkedéseket, vagyis a

felületi morfológiát. A visszaszórt elektron képen a nagyobb rendszámú elemek világosabbak, a kisebbek pedig sötétebbek. Azért világosabbak a nagyobb rendszámú elemeket tartalmazó szemcsék, mert a nagyobb atommagokon nagyobb mértékben visszaverődnek az elektronok. Mi a világosabb területeket kerestük, mert a tórium és az urán nagy rendszámú elem.

A pásztázó elektronmikroszkóp mélységélessége 3-4 mm is lehet kis nagyítás esetén, a fénymikroszkópé ezzel ellentétben 1-10 μm . A mélységélesség az a távolság, amit a mikroszkóp élesen képes érzékelni. A fókuszpontban a legélesebb. Felbontóképessége 5 nm lehet szekunder elektron üzemmódban, ez két nagyságrenddel nagyobb, mint a fénymikroszkópok átlagos 100-200 nm-es felbontása. Visszaszórt elektron módban ez az érték kisebb (Pozsgai, 1995).

Egy EDAX PV 9800 típusú energiadiszipatív röntgenspektrométert (EDS) használtunk, amely a SEM-oz volt csatlakoztatva. Az EDS segítségével, karakterisztikus röntgensugárzás létrehozásával tudjuk meghatározni hogy milyen elemek vannak a mintában. Az EDS alapja a Si(Li) félvezető detektor. A detektor működésének lényege, hogy röntgensugárzás hatására a szilíciumból töltéshordozók szabadulnak fel, ez energiatöbblettel jár. Az így felszabadult fotoelektronokat a vezetési sávba emeli a detektor.

Az EDS-sel végzett mikroanalízishez a visszaszórt elektron kép segítségével választottuk ki a területeket. Az elemek meghatározása úgy történik, hogy a kiválasztott helyről karakterisztikus röntgensugárzást detektál a Si(Li) félvezető detektor. A karakterisztikus röntgensugárzás elemspecifikus, tehát a sugárzás energiájából következtetni lehet az elem minőségére. Ez a sugárzás úgy keletkezik, hogy a sugárnyaláb az elem egyik héjáról kiüt egy elektront. Mivel az atomokban az elektronok energiaminimumra törekednek, ezért egy felsőbb héjról a kiütött helyére beugrik egy elektron. A két héj közötti energiakülönbséget karakterisztikus röntgensugárzás formájában bocsátja ki az atom. Az EDS előnye, hogy a mintában lévő összes elemet párhuzamosan képes detektálni a nátrium és a nála nagyobb rendszámú elemek esetén ($Z > 10$), valamint, hogy roncsolásmentesnek tekinthető a technika.

A szitasoron elkülönített 0,063-0,125 mm, 0,125-0,25 mm, 0,25-0,5mm és a 0,5-1 mm frakciókból válogattunk ki szemcseméretekként 50-70 szemcsét Nikon SMZ800-as mikroszkóp alatt, ezekről fényképeket készítettünk a mikroszkópra szerelt Nikon Coolpix E950-es fényképezőgéppel. A színeket tekintve válogattunk sárga, vörös, fekete és tarka szemcsét is. A szemcséket egy 600-as porral felcsiszolt 2,5-3 centiméteres üvegre ragasztottuk pillanatragasztóval. Az üveglapra egy-egy frakciót tettünk, minden lapon négy

sorba helyeztük a mintát, soronként azonos színnel. A szemcséket is befedtük pillanatragasztóval. A ragasztás után elkezdtük csiszolni a mintát 600-as csiszolóporon. A 600-as por után 800-as, majd 1000-es por következett. A végső egyenetlenségeket gyémántporral políroztuk. Az elkészült üveglapokra vékony (20 nm) szénréteget vittünk fel vákuumgőzölő segítségével, hogy a mintánk felülete vezető tulajdonságú legyen, ne töltődjön fel a vizsgálatok során.

6.5. Radon- és toronexhaláció meghatározásának módszere

A talajminták radon- és toronexhalációjának meghatározásához egy Durrige RAD7 Electronic Radon Detector műszert és hozzá műanyag csövekkel csatlakoztatott úgynevezett radonkamrát használtunk.

A RAD7 Si félvezető detektora a radon és toron leányelemeinek α -bomlásait méri. A detektortérben elektromos teret hoz létre a műszer, aminek a negatív pólusa a detektor felületének irányában van, ezért a pozitív töltésű leányelemeket a detektorra vonzza. A bomlások így a detektor felületén következnek be.

A műszer négy, ún. energia ablakban számlálja a radon és toron leányelemek α -bomlásait. Ezek egyenként 20-20 csatornából állnak, amelyek 50 keV-os energiatartományt ölelnek át. Az A-val jelölt ablakban a ^{218}Po (radon első leányeleme) és a ^{212}Bi (toron harmadik leányeleme) detektálódik. A két izotóp α -részecskéjének energiája csak 50 keV-al tér el egymástól (egy csatorna), ezt az eltérést a RAD7 nem tudja detektálni (a Gauss-görbék egybe mosódnak). A B ablakban a ^{216}Po , a toron bomlásterméke, a C-ben a ^{214}Po radon leányelem és a D-ben a ^{212}Po , toron származék detektálódik.

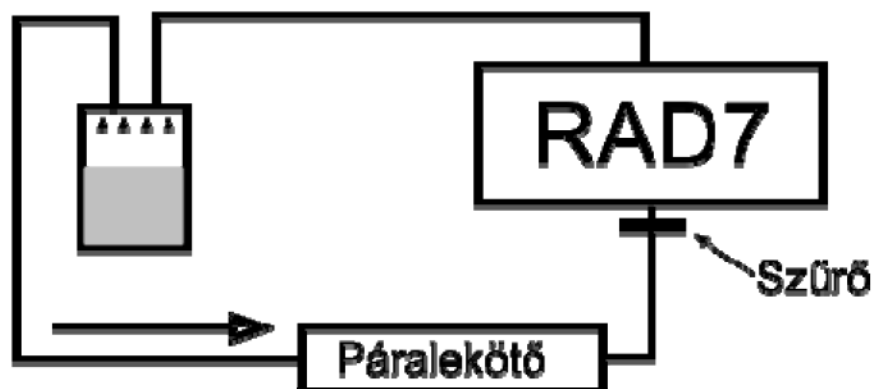
A radonaktivitás-koncentrációra a ^{218}Po beütésszámából következtetünk. Az A ablakba érkezett beütésszámból le kell vonni a ^{212}Bi értékeket. Ezt a korrigált értéket a RAD7 úgy számolja, hogy ^{218}Po beütésszám = A ablak – 0,515 * D ablak (Durrige, 2000). A területről származó korábbi mérési eredmények (Szabó és Boros, 2009; Szabó 2009) alapján a nagy toronaktivitás-koncentráció befolyásolja a RAD7 pontos működését. Ilyen esetekben a korrekciós értékeket fel kell vinni 0,58 körülire, így a képlet módosul: ^{218}Po beütésszám = A ablak – 0,58 * D ablak, ezt manuális átszámítással tudjuk alkalmazni. A toronaktivitás-koncentrációt a B ablakból számítja a RAD7. Az itt detektált ^{216}Po értékével számolhatunk.

A detektorban lévő toronaktivitás-koncentráció kisebb, mint az eredeti, megmintázott térfogatban lévő. Ez azért van, mert a toron felezési ideje 55,6 másodperc és a detektorba áramlás közben bizonyos százaléka elbomlik az atomoknak. Tehát az eredeti koncentráció a következőképpen adható meg: $c_0 = c_m / e^{-\lambda V t / s}$, ahol c_0 az eredeti, megmintázott térfogatban

jelenlévő toronaktivitás-koncentráció [Bq/m^3], c_m a mért toronaktivitás-koncentráció [Bq/m^3], λ a toron bomlási állandója [$1/\text{s}$], $V_{\text{út}}$ az áramlási út térfogata [cm^3], az s pedig a RAD7 pumpája által meghatározott áramlási sebesség [cm^3/perc] (Durrige, 2000).

A radonaktivitás-koncentráció meghatározásakor a mérés első 10-15 percének eredményeit nem szabad figyelembe venni, mert a szekuláris egyensúly a radon és a ^{218}Po között 10-15 perc alatt áll be. Ezzel ellentétben a toronaktivitás-koncentrációhoz ezt az időt is lehet értékelni, mert a ^{216}Po bomlásakor keletkező α -részecskéket detektálja a műszer, amely izotópnak felezési ideje 0,15 másodperc, így a szekuláris egyensúly 0,45-0,75 másodperc alatt beáll.

A RAD7-et műanyag csövekkel kötöttük össze a radonkamrával. A radonkamrából a másik cső a páralekötőbe megy, majd onnan egy szűrőn keresztül vissza a RAD7-be (8. ábra).



8. ábra: A mérési elrendezés sematikus ábrája

Mindkét mintát (NK5, NK6) radonkamrákba helyeztük. A radonkamra egy 366 cm^3 térfogatú alumínium henger, amelynek a teteje lecsavarható és a fedőn két csap helyezkedik el. A mintákat a ^{222}Rn felezési idejének ötszöröséig (mindkét minta esetében három hét) állni hagytuk, majd a háttérmerést követően a 8. ábrán látható módon a RAD7-hez kötöttük a kamrákat. A két mérés között három napot vártunk, hogy a toron leányelemei elbomoljanak (^{212}Pb felezési ideje 10,64 óra) és ne befolyásolják a második minta mérési eredményét.

Először a 3×15 perces háttérmeréseket indítottuk el. Ezen mérések után a kamrákat a műanyag csövek segítségével hozzákötöttük a radondetektorhoz és a radonkamra csapjainak kinyitása után elindítottuk a mérést. Mindkét minta esetében három napos mérés volt, 15 perces mérési ciklusokkal. A RAD7 által mért radon- és toronaktivitás-koncentrációt korrigálni kell a megnövekedett térfogat miatti felhígulással és a háttér aktivitás-koncentrációjával: $C_1 = C_m + C_m \cdot V_{\text{det}}/V_{\text{net}} - C_h \cdot V_{\text{det}}/V_{\text{net}}$, ahol a C_1 a kamrában kialakuló aktivitáskoncentráció [Bq/m^3], C_m a mért aktivitáskoncentráció [Bq/m^3], C_h a laborban mért

aktivitáskoncentráció, amely megegyezik a csövekben lévő aktivitáskoncentrációval [Bq/m^3], V_{det} a detektor és a RAD7-hez csatlakoztatott műanyag csövek térfogata [m^3], a V_{net} pedig a radonkamra térfogatából kivont minta térfogata [m^3]. Az exhaláció értéke: $C_1 \cdot V_{\text{net}}$, ezt a minta tömegével elosztva kapható meg a fajlagos exhaláció

Hibaszámitáshoz figyelembe vettük a térfogat és a koncentráció mérési hibáját. Ezen hibákhoz képest a tömegmérési hiba elhanyagolható, ezért azzal nem számoltunk.

6.6. Gamma-spektroszkópiai mérések módszere

Kutatómunkánk során gamma-spektroszkópiás méréssel határoztuk meg a vizsgált minták (NK5, NK6) ^{226}Ra és ^{232}Th fajlagos aktivitását és koncentrációját. Mind a fajlagos aktivitás, mind a koncentráció kiszámításához elengedhetetlen, hogy a mintában beálljon a szekuláris egyensúly. Ilyenkor az anyaelemek és a leányelemek aktivitása megegyezik. Mindez alapfeltétele az, hogy az anyaelem felezési ideje nagyságrendekkel nagyobb legyen a leányelem felezési idejénél és a leányelem felezési idejének körülbelül három-öttszöröse teljen el, mert ekkor nagy pontossággal megegyeznek az aktivitások.

A használt műszer egy nagy tisztaságú germánium (HPGe) detektor és a hozzá csatlakoztatott CAMAC spektroszkópiai analízátor modul. A detektor anyagával háromféle módon léphet kölcsönhatásba a gamma-foton: az első a fotoeffektus, a második a Compton-szórás, a harmadik pedig a párkeltés. A fotoeffektus során a gamma-foton teljes energiáját átadja a kötött elektronnak, majd megsemmisül. Az így átadott energia a spektrumban úgynevezett teljes energiacsúcsot hoz létre. A fotoeffektus valószínűsége a rendszám ötödik hatványával arányosan nő (ezért célszerű nagy rendszámú elemet használni detektorként). A Compton-effektus során a gamma-foton a szabad (nem kötött) elektronokon szóródik. Ennek az energia átadásnak a valószínűsége a rendszám harmadik hatványával arányos. A spektrum elején található a Compton-hát, amely minimalizálására törekednek a detektorgyártók, ezért is használnak nagy rendszámú elemet (Dickson, 2004). A párkeltés során a gamma-foton az egyik atommag erőterében egy pozitront hoz létre, amely az ott lévő egyik elektronnal párt alkot. Ez a párképzés csak akkor jöhet létre, ha a gamma-sugárzás energiája nagyobb, mint 1022 keV (az elektron és a pozitron nyugalmi tömegének megfelelő energia). A pozitron az elektronnal egyesül és átalakul két (vagy ritka esetben három) 511 keV energiájú fotonná, amelyek egymással ellentétes irányban hagyják el az annihiláció pontját.

Az előzőekből kiderül, hogy a fotoeffektus során karakterisztikus csúcsokat kapunk. A csúcsokra különböző magasságú Gauss-görbék illeszthetők, amelyek szélessége körülbelül 100 eV. Ezeket a Gauss-görbéket csúcselemző program segítségével ki lehet

értékelni a spektrumban. A vízszintes tengelyen az energia, míg a függőlegesen a beütésszám található. Az adott energiához adott radioaktív izotóp tartozik. Az aktivitás és a fajlagos aktivitás kiszámítása előtt lefuttattunk egy három napos háttérmerést. Az így kapott háttéradatokat a pontos kiértékeléséhez le kell vonni a mért értékekből, mert a detektor esetleges elszennyeződése befolyásolja az adott energiához tartozó beütésszámot (magnöveli).

Adott energiához adott izotóp és annak aktivitása tartozik, amely a következő módon számolható ki: $A = N/(t \cdot \epsilon \cdot \eta) - N_H/(t_H \cdot \epsilon \cdot \eta)$, ahol A az aktivitás [Bq], N a beütésszám [db], N_H a háttérsugárzás beütésszáma [db], t a mérési idő [s], t_H a háttérmerés ideje [s], ϵ a relatív gyakoriság (a bomlás során a fotonok hányad része kerül a vizsgált csúcsba), a η pedig az adott energiára és geometriai elrendezésre jellemző hatásfok.

A gamma-spektroszkópiai méréseket az ELTE-TTK Atomfizikai Tanszékén végeztük. A GC1520-7500 SL típusú HPGe detektor egy ólomkamra belsejében van elhelyezve, hogy a kintről érkező sugárzások a mérést a legkevésbé befolyásolják. A detektorhoz kapcsolódó mérőrendszer 100-2800 keV közötti gamma-fotonokat detektálja, melyeket energiák szerint 4096 csatornába gyűjt. A csúcs alatti területet Spill számítógépes elemző programmal értékeltük ki, amelyet az Atomfizikai Tanszék fejlesztett ki. A relatív gyakoriságot egy interneten is hozzáférhető adatbázisból kerestük ki (*Nuclides, 2000*). A hatásfok meghatározásához különböző, a mintára vonatkozó adatokra van szükség: a minta geometriai adataira, illetve az átlagos rendszámra, sűrűsége. A talajmintára vonatkozó átlagértékek meghatározásához egy átlagos SiO_2 talajt vettünk figyelembe (*Filep, 1999*). A hatásfokot kiszámító program Monte-Carlo szimuláció alkalmazásával határozza meg az adott energiához kapcsolódó hatásfokot (*EPR labor leírás, 2009*).

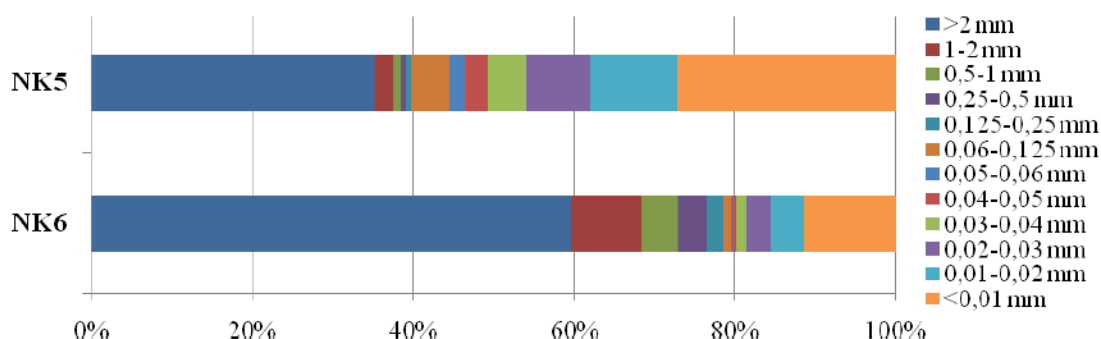
Mint ahogy a fentiekben már említettük a két mintánk lemérése előtt háromnapos háttérmerést indítottunk. A két, legalább 3 hete lezárt kamrát egy-egy napos mérésre tettük be az ólomtéglákból felépített mintatérbe. Mivel a minta mérése egy napos, a háttér mérése három napos volt, azért az adott energiákhoz tartozó háttérbeütések számát harmadolnunk kellett. A mérésekhez tartozó adatsorokat a már említett két programmal értékeltük ki, majd ezek után táblázatba rendeztük. A ^{232}Th és a ^{238}U (^{226}Ra) bomlási sorához tartozó izotópcsúcsokat kiválasztva értékeltük ki a mintáinkat. A ^{232}Th sorhoz tartozó ^{228}Ac (270 keV, 338 keV, 911 keV, 969 keV), ^{214}Bi (288 keV, 453 keV, 785 keV, 785 keV, 893 keV, 1621 keV) és ^{208}Tl (511 keV, 583 keV, 2615 keV) csúcsokat elemeztük. A ^{226}Ra -ot a radioaktív családjába tartozó ^{214}Bi (295 keV, 352 keV) és a ^{214}Pb (609 keV, 1765 keV) csúcsokkal értékeltük. A kapott értékekből kiszámoltuk az aktivitást és a fajlagos aktivitást.

A fajlagos aktivitás segítségével ki tudtuk számolni a tórium és meg tudtuk becsülni az urán koncentrációját ppm-ben (g/t). A koncentráció számításának a menete a következő: $c = K \cdot A$, $K = 1000M/N_A \cdot \lambda$, ahol c a koncentráció [ppm], K átváltó konstans, melynek értéke ^{232}Th esetében 0,2472 kg/Bq, ^{226}Ra -nál (^{238}U) pedig 0,08063 kg/Bq, A a fajlagos aktivitás [Bq/kg], M a tömegszám [g/mol], N_A az Avogadro-szám ($6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol), a λ pedig a bomlási állandó [1/s].

7. Eredmények

7.1. Nedves szitálás és a lézeres szemcseeloszlás mérés eredményei

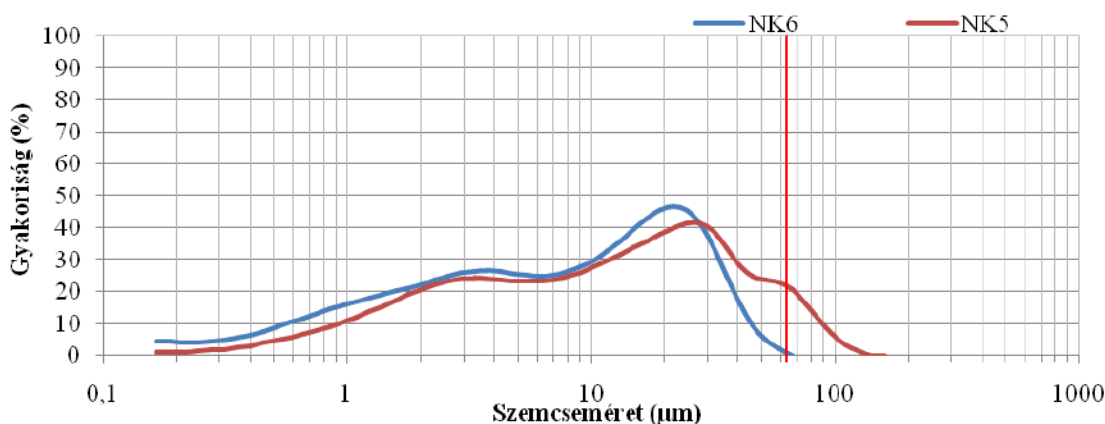
A szitálás és a lézeres szemcseeloszlás mérés eredményeit egy, közös diagramon (9. ábra) ábrázoljuk mindkét vizsgált minta esetében.



9. ábra: NK5 és NK6 minta szitasorral és lézeres szemcseeloszlás mérővel meghatározott százalékos szemcseméret-eloszlása

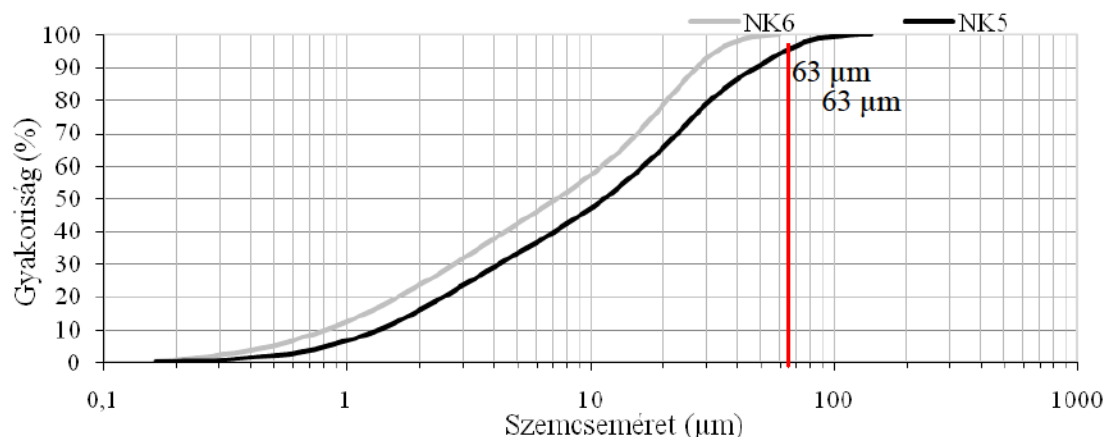
A 12 frakció közül százalékosan a legnagyobb a 2 mm feletti frakció, ezt követi a 10 μm alatti szemcseméret. A 2 mm feletti szemcseméret az NK6-os mintának megközelítőleg 60 %-a. Ez azért lehetséges, mert a mintánkban több 5-6 centiméteres karbonátos közettörmelék is található. NK5 minta esetében körülbelül ugyanakkora a legkisebb és legnagyobb frakció részaránya.

Az 10. ábrán látható a százalékos szemcseeloszlás görbe (lézeres szemcseeloszlás mérés eredménye). Ezek a százalékos értékek csak a lemért, a szitálás során kapott legkisebb szemcseméret frakcióra vonatkoznak (<0,063 mm).



10. ábra: Az NK5 és NK6 minták 63 µm alatti frakciójának százalékos szemcseeloszlás görbéje

Mindkét vizsgált minta esetében látható, hogy a körülbelül 0,16 µm alatti frakcióról nem kaptunk adatot, mert ez a szemcseméret már a lézeres szemcseeloszlás mérő műszer mérési tartományán is kívül esik. Továbbá azt látjuk, hogy az NK6 minta esetében két, jól kivehető maximumunk van 4 µm és 20 µm közelében, illetve van egy kisebb maximum is, körülbelül 0,9 µm-nél. Az NK5 minta esetén is három maximum figyelhető meg körülbelül 3 µm, 25 µm és 65 µm közelében. Az NK5 mintánál körülbelül 5%-os (11. ábra) a műszerhiba (63 µm felett is folytatódik az eloszlásgörbe), ezt okozhatja az agyagszemcsék összetapadása vagy a szemcsék aszimmetrikus formája.



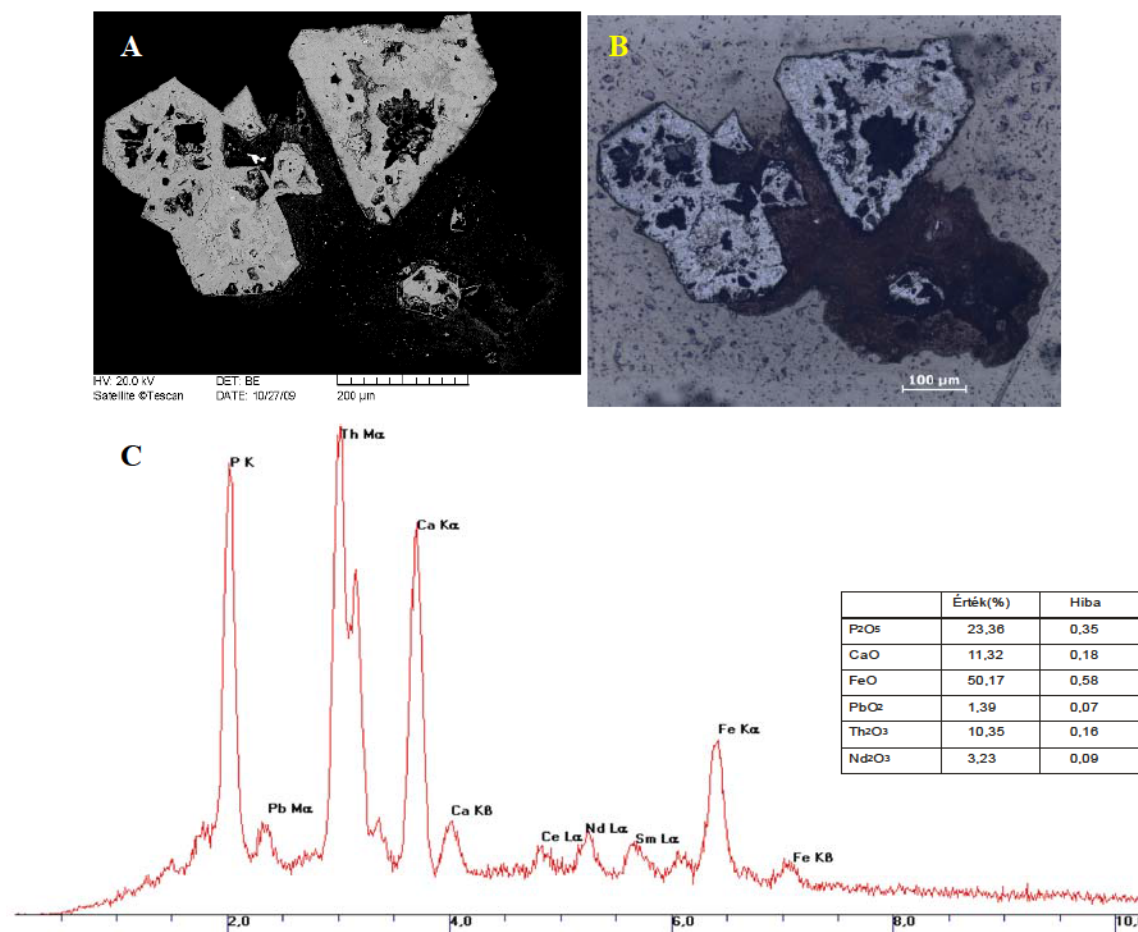
11. ábra: Kumulatív gyakoriság görbe, amely megmutatja, hogy az össz minta (szítálás után kapott legkisebb frakció, <0,063 mm) hány százalékát teszi ki az addigi szemcseméret tartomány

A 11. ábrán az NK5 és az NK6 minta kumulatív gyakoriság görbéit ábrázoltuk. A görbéknek több inflexiós pontja van, amely a 10. ábrán található görbék helyi minimum és maximum értékeinél található. A kumulatív görbéről leolvasható, hogy adott szemcseméret

tartomány a teljes minta (szitálás után kapott legkisebb frakció, <0,063 mm) hány százalékát teszi ki. Ha két szemcseméret tartomány közötti százaléktértekre vagyunk kíváncsiak, akkor a nagyobb szemcsemérethez tartozó százaléktértekből ki kell vonni a kisebbhez tartozó értéket.

7.2. Pásztázó elektronmikroszkópos és energiadisziperzív röntgenspektrométeres vizsgálatok eredményei

A pásztázó elektronmikroszkópos és az energiadisziperzív röntgenspektrométeres vizsgálatok eredményeit mutatja be ez a fejezet. Az ezzel a módszerrel megvizsgált szemcsék közül csak két jellegzetest mutatunk be jelen dolgozat keretein belül az alábbiakban.

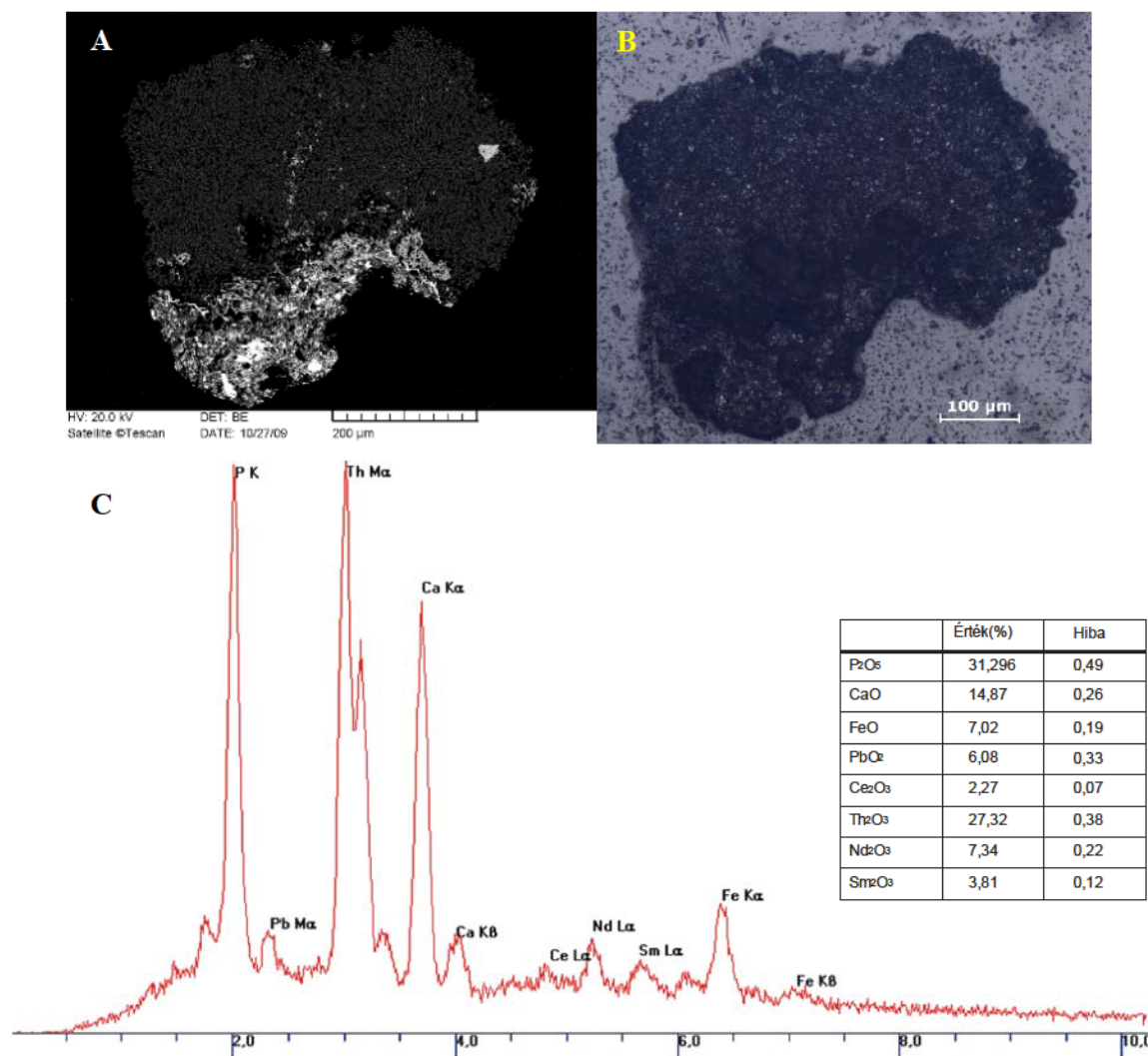


12. ábra: NK6 minta SEM (A) és fénymikroszkópos (B) képe a 0,25-0,5 mm szemcseméret tartományból, illetve a nagy tórium tartalmú frakció röntgen spektruma és tömegszázalékos eloszlása (C)

A 12. ábrán több üreget (12/B ábra, fekete szín) tartalmazó, vas gazdag szemcse látható, amelynek a közepében egy tórium (12/A ábra, nagyon világos) gazdag ásványt azonosítottunk. Ebben a tóriumos szemcsében (12/A ábra, nagyon világos) a ritkaföldfémek

közül a neodímium (Nd) is megtalálható, amint a felvett spektrum bizonyítja. A szürke rész vas-oxid (12/B ábra).

A cheralitként azonosított szemcsének többsége foszfor- (és vas-) tartalmú, kisebb, de nem elhanyagolható részben van jelen tórium és kalcium, illetve kis százalékban látható Nd és Pb is a spektrumban.



13. ábra: NK5 minta SEM-os (A) és fénymikroszkópos (B) képe a 0, 5-1 mm szemcseméret tartományból, illetve a tóriumos frakció röntgen spektruma és tömegszázalékos eloszlása (C)

A 13. ábrán látható, hogy a szemcse két teljesen különböző összetételű részre osztható. A sötétebb részen kisebb rendszámú, szerves anyag tartalmú anyag található (13/A ábra), amelynek a kisebb átmérőjű atommagjain kevesebb elektron verődik vissza. A világosabb részen két összetétel van: a szürke vas-oxid, illetve a fehér, amely cheralit (12/A ábra). A cheralit frakcióban nagy foszfor és tórium tartalom van jelen, de nagy mennyiségű még a kalcium is. Kisebb százalékban megtalálható az ólom, neodímium, szamárium és a cérium is.

7.3. Radon- és toronexhaláció mérések eredményei

Az általunk begyűjtött és az előzőekben tárgyalt módon elemzett minták radonexhalációjára azt kaptuk, hogy az NK5 minta esetében az érték $1,5 \pm 0,1$ Bq/kg³, az NK6 minta radonexhalációja pedig $2,1 \pm 0,1$ Bq/kg. A toronexhaláció eredményei a következőképpen alakultak: NK5 minta toronexhalációja $29,5 \pm 1,3$ Bq/kg, NK6 minta toronexhalációja pedig 209 ± 8 Bq/kg. Megfigyelhető, hogy mindkét minta esetében jóval nagyobb értéket kaptunk toron esetére, mint radonra (rövidebb felezési idejének ellenére is) és az, hogy NK6 mintának mindkét izotópra vonatkozó értéke nagyobb, mint az NK5 mintában.²

7.4. Gamma-spektroszkópiai mérések eredményei

A 6.4 fejezetben leírt izotópok alapján értékeltük ki a 24 órás mérések során kapott spektrumokat. Ezek alapján a ²³²Th (sor) fajlagos aktivitása a két mintában teljesen eltérő értéket mutatott. Az NK5 mintában átlagosan 54 ± 8 Bq/kg, míg az NK6 minta esetében 577 ± 31 Bq/kg fajlagos aktivitás értéket kaptunk eredményül, miután a különböző energiákon és izotópokra kapott értékeket a Gauss-féle hibaterjedési törvény szerint számolt hibájuk szerint súlyozottan átlagoltuk. A tórium tartalmat ppm-be átszámítva NK5 minta értéke 13 ± 2 ppm, NK6 mintánál pedig 143 ± 8 ppm lett az eredmény. A ²²⁶Ra (²³⁸U sor) fajlagos aktivitása az NK5 minta esetében $3,2 \pm 0,3$ Bq/kg, az NK6 minta esetében pedig $2,8 \pm 0,8$ Bq/kg. Feltételezve a szekuláris egyensúlyt a ²²⁶Ra és az ²³⁸U között, az urán koncentráció NK5 minta esetében $0,26 \pm 0,02$ ppm, NK6 mintánál pedig $0,23 \pm 0,06$ ppm.

³ Itt a Bq/kg mértékegység azt jelenti, hogy 1 kg mintából hány darab radon vagy toron atom jut ki 1 másodperc alatt.

8. Eredmények értékelése és összefoglalás

Nagy-Kopasz hegyről gyűjtött mintáinkat környezeti szempontok szerint elemeztük. Ezen belül is több analitikai technikát és fizikai elemzési és mérési módszert alkalmaztunk (nedves szitálás, lézeres szemcseeloszlás mérő, pásztázó elektronmikroszkópia, energiadiszperzív röntgenspektrometria, radon- és toronexhaláció mérés, gamma-spektroszkópia).

A nedves szitálás és lézeres szemcseeloszlás eredményei szerint mindkét vizsgált mintában a 2 mm feletti és a 10 μm alatti frakció van jelen a legnagyobb mennyiségben. Mivel a legkisebb frakció (10 μm alatti) nagy mennyiségben jelen van mindkét mintában, ezért szükséges volt meghatározni a radon- és toronexhaláció értékeket (a szemcseméret csökkenésével nő a fajlagos felület, ami megnöveli a radon és toron atomok kijutásának valószínűségét). A radon- és toronexhaláció mérések eredményei szerint, mindkét minta esetében a toronexhaláció értékek (NK5: $29,5 \pm 1,3$ Bq/kg, NK6: 209 ± 8 Bq/kg) az említésre méltók a radonexhalációval szemben (NK5: $1,5 \pm 0,1$ Bq/kg, NK6: $2,1 \pm 0,1$ Bq/kg), ami az irodalmi adatokkal egybevágóan az urán elhanyagolható szerepét jelzi (*Wéber, 1983*). A meddőhányó nagyobb aktivitású zónájából származó minta (NK6) toronexhalációja jelentősebb (209 ± 8 Bq/kg), mint az NK5 minta esetében, ami megerősíti a másodlagos felhalmozódás tényét.

A két minta ^{226}Ra aktivitása közel megegyező értéket mutatott (NK5: $3,2 \pm 0,3$ Bq/kg, NK6: $2,8 \pm 0,8$ Bq/kg), de ^{232}Th aktivitása (NK5: 54 ± 8 Bq/kg, NK6: 577 ± 31 Bq/kg) az NK6 jelű mintának körülbelül tízszer nagyobb lett (gamma-spektrum alapján számítva). Az *UNSCEAR (2000)* magyarországi értékekre vonatkozó adatbázisával összevetve azt kaptuk, hogy a ^{226}Ra fajlagos aktivitása NK5 és NK6 minta esetén is tizede az átlaghoz (33 Bq/kg) képest, ezzel szemben a ^{232}Th fajlagos aktivitása NK5 minta esetében közelítőleg duplája, NK6 minta esetén pedig majdnem hússzorosa az átlagnak (28 Bq/kg). Tehát negatív urán és pozitív tórium anomália található a vizsgált, 1. számú aknában és közelében.

A radon- és toronexhaláció értékek és a ^{226}Ra és ^{232}Th fajlagos aktivitások hányadosaként meghatározhatók a minták radon- és toronexhalációs együtthatói (a keletkező radon vagy toron hány százaléka jut ki a mintából). Ezek az értékek láthatók az alábbi táblázatban (4. táblázat).

4. táblázat: A radon-és toronexhalációs együtthatók meghatározás NK5 és NK6 minta esetében (REX laborleírás, 2009)

minta	radonexhalációs együttható	hiba	toronexhalációs együttható	hiba
NK5	48 %	5 %	55 %	8 %
NK6	77 %	22 %	36 %	2 %

A négy érték közül az NK6 minta radonexhalációs együtthatója nem fogadható el valós értéként (a meghatározási pontatlanság miatt), ettől az értéktől eltekintve a 4. táblázat alapján NK5 radon- és toronexhalációs együtthatója, valamint NK6 toronexhalációs együtthatója arra utal, hogy a mintáknak rendkívül nagy a radon- és toron kibocsájtó képessége is. Mind a hosszabb felezési idejű radont és mind a rövidebb felezési idejű toront hasonló mértékben képesek exhalálni (figyelmen kívül hagyva az NK6 minta toronexhalációs együtthatóját).

Jelen dolgozat keretein belül vizsgált lokális anomália környezeti szempontból nem jelent veszélyforrást, figyelembe véve a terület lakatlanságát. Azonban, ha ugyanez a szituáció egy lakott területen állna fenn, akkor mindenképpen foglalkozni kellene a lehetséges környezetre gyakorolt hatásokkal.

Mint az 2.3.2. *alfejezetben* bemutatott tóriummal üzemelő reaktorok lehetőségének realitása mutatja, a Nagy-Kopasz hegyen a korábbi kutatók (*Gerzson és Wéber, 1961; Wéber, 1983; Dudko, 1984; Szabó et al., 1988; Wéber, 2002; Szabó és Boros, 2009*) által is megvizsgált tórium anomália gazdasági kihasználhatósága is felvetődött jelen munka során (a későbbiekben a ritkaföldfémek kiaknázhatóságának kérdése is érdekes lehet). Ez azonban még további vizsgálatokat igényel.

English abstract

The Buda Mts. in the environment of radioactive anomaly investigation

The thorium anomaly at Buda Mts., exactly at the Nagy Kopasz hill, has been studied since the 1950s. Most of the analysis made by MÉV (Mecseki Ércbányászati Vállalat) and MÁFI (Magyar Állami Földtani Intézet). The heightened drilling and evaluation of the samples showed a significant rare earth element indication (e.g. Y, Nb) at Buda Mts. These elements can be easily replaced by thorium in the minerals crystal lattice.

Economic usability of this area is an important question. It is in connection with that this thorium anomaly can be utility for nuclear energy. In this study we are also going to show the nuclear reactors, especially the opportunity a reactor which uses thorium to make energy. This is mainly because ^{232}Th is more abundant than ^{235}U which is only the 0,7% of total uranium. In our study we also would like to shed light to this anomaly how act in our environment.

The samples for laboratory investigation stem from trench one's dump, which has been heightened by MÉV at 1950s. Here we measure 1700nSv/h, this is ten times greater than the background (70-90 nSv/h). We analyse this soil sample from the dump with geochemical and physical techniques. That means, one part of the soil is taken into radon chamber. After the setting of secular equilibrium the radon and thoron exhalation rate has been determined by RAD7. In line with this measurement, we did gamma-spectroscopy analysis and determined the thorium and uranium content. Another part of the sample has been classified by grain size. Then we separate and stick it a part of glass from every fraction, and selected the interesting grains. Scanning Electron Microscopy (SEM) is a method to realise the analytical content primarily the thorium.

Results refers to that our samples have a very high content of thorium which is in cheralite mineral grains. Therefore economical usability is a real question which needs to be studied in the future. A high amount of thoron can escape from this type of samples, but it does not have environmental effects in case of the anomaly areas are at unsettled sites.

Köszönetnyilvánítás

Először is meg szeretnénk köszönni témavezetőnknek Szabó Csabának a szakértelmét, illetve konzulenseinknek Szabó Zsuzsinak és Boros Ákosnak a hosszú, végtelennek tűnő éjszakákon át nyújtott segítséget. Köszönet jár összes LRG tagnak, elsősorban Nagy Hedinek, aki tartotta bennünk a lelket, amikor nem voltak jelen a konzulenseink; Németh Biának, akinek általános vidámsága oldotta a feszültséget és felvidített bennünket, Guzmics Tibinek, aki segített a grafikonok szerkesztésében. Továbbá meg szeretnénk köszönni a minket hátulról támogató embereknek azt a végtelen türelmet és támogatást, amelyet az elmúlt időszakban nyújtottak. Végül, de nem utolsó sorban meg szeretnénk köszönni Puszpán Simon úrnak, aki a nagy-kopasz hegyi 1. kutatóaknához elvezetett minket.

Ábra- és táblázatjegyzék

1. ábra: Az ^{238}U bomlási sora	5
2. ábra: A ^{232}Th bomlási sora	7
3. ábra: A Nagy-Kopasz hegy és környékének fedett földtani térképe (Császár et al., 2005; Boros, 2008 által részben módosítva)	16
4. ábra: A Nagy-Kopasz hegy és környékének légigamma-tórium eloszlás térképe – Tyhomirov, 1965; Boros, 2008 által módosítva	19
5. ábra: Az 1. számú akna megközelítési útvonala Budapest, Adyliget irányából. A térképrészlet a Nagy-Kopasz hegy északkeleti részét fedi le	20
6. ábra: A használt FRITSCH Vibratory Sieve Shaker Vibratory Micro Mill szitasor és a FRITSCH Ultrasonic tisztító berendezés	22
7. ábra: A SEM különböző üzemmódjainak gerjesztési térfogata a mintában	23
8. ábra: A mérési elrendezés sematikus ábrája	26
9. ábra: NK5 és NK6 minta szitasorral és lézeres szemcseeloszlás mérővel meghatározott százalékos szemcseméret-eloszlása	29
10. ábra: Az NK5 és NK6 minták 63 μm alatti frakciójának százalékos szemcseeloszlás görbéje	30
11. ábra: Kumulatív gyakoriság görbe, amely megmutatja, hogy az összminta (szitálás után kapott legkisebb frakció, <0,063 mm) hány százalékát teszi ki az addigi szemcseméret tartomány	30

12. ábra: NK6 minta SEM (A) és fénymikroszkópos (B) képe a 0,25-0,5 mm szemcseméret tartományból, illetve a nagy tórium tartalmú frakció röntgen spektruma és tömegszázalékos eloszlása (C)	31
13. ábra: NK5 minta SEM-os (A) és fénymikroszkópos (B) képe a 0, 5-1 mm szemcseméret tartományból, illetve a tóriumos frakció röntgen spektruma és tömegszázalékos eloszlása (C)	32
1. táblázat: A világ becsült tórium készlete.....	8
2. táblázat: Egyes hasadóanyagok és a hozzájuk tartozó termikus- és gyorsneutron hozam (Szatmáry, 1994)	12
3. táblázat: A nagy-kopasz hegyi mérési helyszíneknek (5. ábra) GPS és EOVS koordinátái, illetve mért dózisteljesítményei.....	21
4. táblázat: A radon-és toronexhalációs együtthatók meghatározás NK5 és NK6 minta esetében (REX laborleírás, 2009).....	35

Irodalomjegyzék

- ALLEGRE, C.J., LEWIN, E. AND DUPRE, B. (1988). A Coherent Crust Mantle Model for the Uranium Thorium Lead Isotopic System. *Chemical Geology* 70(3) pp. 211-234.
- BEAUBIEN, S. E., CIOTOLI, G., LOMBARDI, S., 2002: Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123 (2003) pp. 63-80.
- BENCE, G., BERNHARDT, B., BIHARI, D., BÁLINT, CS., CSÁSZÁR, G., GYALOG, L., HAAS, J., HORVÁTH, I., JÁMBOR, Á., KAISER, M., KÉRI, J., KÓKAY, J., KONDA, J., LELKESNÉ FELVÁRY, GY., MAJOROS, GY., PEREGI, ZS., RAINCSÁK, GY., SOLTI, G., TÓTH, Á., TÓTH, GY. 1990: A Bakony hegység földtani képződményei [Geology of Bakony Mountains (Hungary)]. Magyarázó a Bakony hegység földtani térképéhez 1:50 000. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, p. 119.
- CSÁSZÁR, G. szerk. 1996: Magyarország litosztratigráfiai alapegységei. Kréta. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, p. 163.
- DENMAN, A. R., CROCKETT, R. G. M., GROVER-KIRKBY, C. J., PHILLIPS, P. S., GILLMORE, G. K., WOOLRIDGE, A. C. 2007: The value of seasonal correction factors in assessing the health risk from domestic radon — A case study in Northamptonshire, UK, *Environmental International*, 33, pp. 34-44.

- DICKSON, BRUCE L. 2004: Recent advances in aerial gamma-ray surveying; Journal of Environmental Radioactivity Volume 76, Issues 1-2, 2004, Pages 225-236
- DUDKO, A. 1984: Magmás képződmények kutatása mágneses módszerrel Nagykovácsi környékén
- DURRIDGE COMPANY INC. 2000: RAD7 RADON DETECTOR Owner's Manual, p. 77.
- FILEP, GY. (1999): A talaj fizikai tulajdonságai, A talaj szemcseösszetétele, A talajok osztályozása a szemcseösszetétel alapján in: Stefanovits, P.: Talajtan – Mezőgazda Kiadó, Budapest, pp. 136-139.
- GÁLNÉ SOLYMOS, K., NAGY, B.-né, PUSKÁS, Z. 1988: Különböző ásványszemcsék ritkaföldfém, niobium és egyéb elemtartalmának vizsgálata, valamint a szemcsék ásványtani meghatározására. ELTE Közettan-Geokémiai Tanszék. Kutatási jelentés. MÉV KMÜ Adattár. Kézirat
- GERZSON, I., WÉBER, B., 1960: Zárójelentés a Budai-hegységben Nagykovácsi környékén 1956-57-58. években végzett radioaktív nyersanyag kutatásáról. MÉV Adattár.
- GUIZI, Z., DETAO, X., YONGJUN, X. 2008: Survey of radon and thoron concentrations in two types of countryside dwellings. Radiation Measurements 43(Supplement 1): pp. S479-S481.
- GUO, Q., SUN, J., ZHUO, W. 2000: Potential of high thoron exposure in China. Journal of Nuclear Science and Technology volume: 37 pp. 716-719.
- HAAS, J. szerk. 2004: Magyarország geológiája. Triász. — ELTE Eötvös kiadó, Budapest, p. 384.
- HORVÁTH, I., DARIDÁNÉ, TICHY M., ÓDOR, L. 1983: Magnezittartalmú dolomitos karbonatit (Beforsit) telérközet a Velencei-hegységből. Földtani Int. Évi Jel. Az 1981 évről, pp. 369-388.
- HORVÁTH, I., ÓDOR, L. 1984: Alkaline ultrabasic rocks and associated silicocarbonatites in the NE part of the Transdanubian Mts. (Hungary). Mineralia Slovaca, 16 (1), pp. 115-119.
- JÁMBOR, Á. 1980: A Dunántúli-középhegység pannóniai képződményei. (Pannonian in the Transdanubian Central Mountains.) — Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 259
- JÖNSSON, G., BAIXERAS, C., ENGE, W., FREYER, K., TREUTLER, H.-C., MONNIN, M. M., SCIOCCETTI, G. 1995: Criteria for indoor radon concentration — an experimental study considering especially the Leipzig-halle brown coal area, Radiation Measurements, 25, pp. 627-630.

- KISS, D., HORVÁTH, Á., KISS, Á. 1998: Kísérleti atomfizika - ELTE, Eötvös kiadó, Budapest, pp. 312-331.
- KOCH, S., SZTRÓKAY, K. I., 1967: Ásványtan II. - Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- KORPÁS, L. 1981: A Dunántúli-középhegység oligocén–alsó-miocén képződményei. — A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve LXIV, p. 140.
- KUBOVICS, I., SZABÓ, CS. 1988: Geochemical, Petrologic and Mineralogical study on alkali mafic and ultramafic dike rocks from Alcsutdoboz-2 drill hole (in Hungarian). Magy. Áll. Földt. Int. Évk. LXV, pp. 335-356.
- NAZAROFF, W. W. AND NERO, A. V. JR. 1988: Radon and its decay products in indoor air. – John Wiley&Sons, New York, p. 518.
- NUCLIDES 2000: An Electronic Chart of the Nuclides on CD
- PERRIER, F., RICHON, P., BYRDINA, S., FRANCE-LANORD, C., RAJAURE, S., KOIRALA, B. P., SHERESTHA, L. P., GAUTAM, U. P., TIWARI, D. R., REVIL, A., BOLLINGER, L., CONTRAIRES, S., BUREAU, S., SAPKOTA, S. N., 2009: A direct evidence for high carbon dioxide and radon-222 discharge in Central Nepal, Earth and Planetary Science Letters 278 (2009) pp. 198-207.
- POZSGAI I., 1995: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai - ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, p. 172.
- RUBBIA, C. et al., - CERN Reports: AT/95-44,53,58; ET/96-01; LHC/97-01; LHC/96-11
- STEINHAUSLER, F. 1996: Environmental 220Rn: A review. Environment International 22 (Supplement 1): pp.1111-1123. – Ausztia
- SZABÓ, CS., KUBOVICS, I., MOLNÁR, ZS. 1993: Alkaline lamprophyre and related dyke rocks in the NE Transdanubia, Hungary: The Alcsutdoboz-2 borehole. Mineralogy and Petrology, 47, pp. 27-148
- SZABÓ, CS. 1985: Xenoliths from Cretaceous lamprophyres of Alcsútdoboz-2 borehole, Transdanubian Central Mountains, Hungary. Acta Mineralogica-Petrographica, 27, pp. 39-50.
- SZABÓ, J. 1958: Jelentés a Nagykovácsi kutatási területen végrehajtott kísérleti geoelektromos szelvényezés eredményeiről. MÉV Adattár.
- SZABÓ, ZS. 2009: Radon- és toroneloszlás vizsgálata a Zsámbéki-medence északkeleti részén - ELTE Közettani és Geokémiai Tanszék, Diplomadolgozat, p. 57.
- SZABÓ, ZS., BOROS, Á. 2009: Tapasztalatok a Nagy-Kopasz hegyi tórium anomália tanulmányozása során – A RAD7 radonmonitor működése nagy toron exhaláció esetén (Diákköri dolgozat) p. 60.

- SZATMÁRY, Z. 1994: Mit old meg Carlo Rubbia tóriumos energiaszorzója? - Fizikai Szemle 1994/7, p. 293.
- TYHOMIROV 1965: Légi-radiometriai térképcsomag, Pilis-Budai hegység. ELGI
- UNSCEAR Report 2000: Exposures from natural radiation – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- VAN KLINKEN, J. 1999: Energia tóriumból, Fizikai Szemle 1999/7, p. 263.
- WÉBER, B. 1962: Thorium és ritkaföld indikációk a Budai-hegységben - Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest pp. 455-457.
- WÉBER, B. 1989: A budai-hegységi Th-anomáliák - Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest pp. 373-388
- WÉBER, B. 2002: A tórium földtani kutatása Magyarországon – Közlemények a magyarországi ásványi nyersanyagok történetéből XIII. Érc kutatások Magyarországon a 20. században, pp. 103-121.
- ZSOLNAY, É. 2007: Üregeffektus mérése – Hallgatói gyakorlat mérési útmutatója, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézet, p. 7.

Internetes hivatkozások:

EOV átszámítás: http://www.agt.bme.hu/staff_h/zaletnyik/Atszamitas.html

World Nuclear Association:

<http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=88&terms=uranium+238>

<http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=448&terms=Thorium+232>

Brookhaven National Laboratory: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

ELTE-TTK EPR laborleírás: <http://ion.elte.hu/~akos/orak/kmod/EPR2.htm>

ELTE-TTK REX laborleírás: <http://ludens.elte.hu/~akos/sflab/>